

ISSN 0233-7584

---

Том 40, № 5

Сентябрь – Октябрь

2024

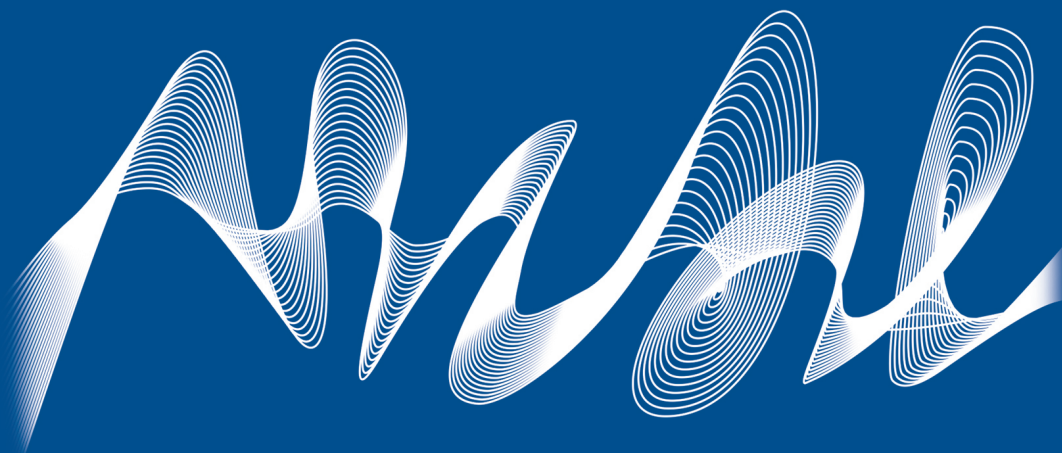
---



# Морской гидрофизический журнал

---

[mgfj.rf](http://mgfj.rf)



ISSN 0233-7584

Том 40, № 5. 2024

Сентябрь – Октябрь

Сквозной номер выпуска – 239

Основан в январе 1985 года

Выходит 6 раз в год

Vol. 40, no. 5. 2024

September – October

Continuous issue – 239

Founded in January 1985

Publication frequency:

6 issues per year

16+

# МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

English language version of the journal is available from  
**Physical Oceanography** ISSN 1573-160X

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

Scientific and theoretical journal

FOUNDER AND PUBLISHER:

Federal State Budget Scientific  
Institution Federal Research Centre  
“Marine Hydrophysical  
Institute of RAS”

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» (К1), группа научных специальностей: 1.6.17. Океанология (физико-математические, географические, технические науки), 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (географические науки), 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (физико-математические, географические науки), 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (физико-математические науки), 1.6.20. Геоинформатика, картография (технические науки), 1.6.20. Геоинформатика, картография (физико-математические 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 № ФС77-76617 от 15.08.2019 г.)

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны

Журнал включен в **Russian Science Citation Index (RSCI)** (1-й квартал)

Журнал включен в «Белый список» Протоколом заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов (Протокол ДА/3855-пр от 20.10.2022 г., Приложение 1)

Переводная англоязычная версия журнала **Physical Oceanography** индексируется **ESCI WoS, Scopus**  
Индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

Является членом Crossref

Плата за публикацию статей не взимается

Электронный адрес: [journal@mhi-ras.ru](mailto:journal@mhi-ras.ru)

Сайт журнала: [mifj.rf](http://mifj.rf)

Адрес учредителя, издателя и редакции:

299011, Россия, г. Севастополь,  
ул. Капитанская, д. 2  
Телефон, факс: +7 (8692) 54-02-23

Founder, Publisher and Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011  
Russia  
Phone, fax: + 7 (8692) 54-02-23

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Коновалов Сергей Карпович** – главный редактор, директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448, secretary@mhi-ras.ru (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Кубряков Александр Иванович** – заместитель главного редактора, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-1899-9230 (Севастополь, Россия)
- Ивашенко Игорь Кондратьевич** – ответственный секретарь, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, к. э. н. (Севастополь, Россия)
- Артамонов Юрий Владимирович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: AAC-6651-2020 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – директор ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – научный руководитель НИИ «АЭРОКОСМОС», академик РАН, д. т. н., проф., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора по научно-методической и образовательной работе ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. г. н., ORCID ID: 0000-0001-7007-9496 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Грязин Дмитрий Геннадьевич** – зав. отделом, главный метролог АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», д. т. н., профессор кафедры мехатроники ИТМО, Scopus Author ID: 25638150600 (Санкт-Петербург, Россия)
- Деметрашвили Демур Ильич** – зав. сектором математического моделирования геофизических процессов моря и атмосферы, Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского госуниверситета им. Ив. Джавахишвили, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-4789-4852 (Тбилиси, Грузия)
- Добролюбов Сергей Анатольевич** – декан географического факультета МГУ, академик РАН, д. г. н., проф., ResearcherID: A-9688-2012 (Москва, Россия)
- Долгих Григорий Иванович** – директор ТОИ ЛВО РАН, д. ф.-м. н., академик РАН, проф., ORCID ID: 0000-0002-2806-3834 (Владивосток, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – зав. лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., проф., ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., проф., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Заболотских Елизавета Валериановна** – ведущий научный сотрудник РГГМУ, д. ф.-м. н., Scopus Author ID: 6506482460 (Санкт-Петербург, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ИВМ РАН, д. ф.-м. н., проф., 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)
- Зодиатис Джордж** – старший научный сотрудник Лаборатории прибрежных и морских исследований Института прикладной и вычислительной математики Фонда исследований и технологий – Эллада, Ph.D., ResearcherID: J-3032-2013 (Ираклион, Крит, Греция)
- Ибраев Рашит Ахметзиевич** – главный научный сотрудник ИВМ РАН, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-9099-4541 (Москва, Россия)
- Кныш Василий Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., проф., ResearcherID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коротасв Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., проф., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кудрявцев Владимир Николаевич** – исполнительный директор Лаборатории спутниковой океанографии РГГУ, д. ф.-м. н., проф., ResearcherID: G-1502-2014 (Санкт-Петербург, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., проф., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель президента РАН, заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ЮНЦ РАН, научный руководитель ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., проф., ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Римский-Корсаков Николай Андреевич** – зам. директора по направлению Морская техника ФГБУН ИО им. П. П. Ширшова РАН, д. т. н., ResearcherID: K-8378-2017 (Москва, Россия)
- Рубино Анджело** – Ph.D., профессор Università Ca' Foscari, ORCID ID: 0000-0003-3857-4811 (Венеция, Италия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Шапиро Георгий Исидорович** – профессор Плимутского университета, руководитель Плимутского центра океанских прогнозов, д. ф.-м. н. (Плимут, Англия)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)
- Шокуров Михаил Викторович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-1595-8281 (Севастополь, Россия)

## EDITORIAL BOARD

- Sergey K. Kononov** – Editor-in-Chief, Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448, secretary@mhi-ras.ru (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Aleksandr I. Kubryakov** – Deputy Editor-in-Chief, Chief Scientist Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-1899-9230, ResearcherID: F-8959-2014, (Sevastopol, Russia)
- Igor K. Ivashchenko** – Executive Editor, Senior Scientist of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Econ.), (Sevastopol, Russia)
- Yuri V. Artamonov** – Head Scientist Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: AAC-6651-2020 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Director of FRC SSC of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Scientific Supervisor of ISR "AEROCOSMOS", academician of RAS, Dr.Sci. (Techn.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Demuri I. Demetrasvili** – Head of the sector of mathematical modeling of geophysical processes of sea and atmosphere, the Nodia Institute of Geophysics of the Javakhishvili Tbilisi State University, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-4789-4852 (Tbilisi, Georgia)
- Sergey A. Dobrolyubov** – Dean of Faculty of Geography of MSU, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), prof., ResearcherID: A-9688-2012 (Moscow, Russia)
- Grigory I. Dolgikh** – Director of POI FEB of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math.), academician of RAS, prof., ORCID ID: 0000-0002-2806-3834 (Vladivostok, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ORCID ID: 0000-0002-0038-7255, (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ResearcherID: P-2063-2017, (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-9070-4460, (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of the Physical Oceanography Department of Israel Oceanographic & Limnological Research, Head of IOLR data center ISRAMAR, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Dmitry G. Gryazin** – Head of Department, Chief Metrologist of SRC of the "Concern CSRI Elektropribor" JSC, Dr.Sci. (Techn.), prof. of Mechatronics of ITMO University, Scopus AuthorID: 25638150600, (Saint Petersburg, Russia)
- Rashit A. Ibraev** – Chief Scientist Researcher of INM of RAS, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-9099-4541 (Moscow, Russia)
- Vasily V. Knysh** – Head Scientist Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ResearcherID: B-3603-2018 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Kudryavtsev** – Executive Director of Satellite Oceanography Laboratory of RSHU, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ResearcherID: G-1502-2014 (Saint Petersburg)
- Michael E. G. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy President of RAS, Deputy academician-Secretary of the Department of Earth Sciences of Supervisor of RAS – Head of the Oceanology, Atmospheric Physics and Geography Section, Scientific Supervisor of SSC of RAS, Supervisor of MMBI KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), prof., ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Nikolay A. Rimski-Korsakov** – Deputy Director (Marine Engineering) of FSBSI P.P. Shirshov IO of RAS, Dr.Sci. (Techn.), ResearcherID: K-8378-2017 (Moscow, Russia)
- Angelo Rubino** – Professor of Ca' Foscari University, Ph.D. (Phys. Oceanogr.), ORCID ID: 0000-0003-3857-4811 (Venice, Italy)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Georgy I. Shapiro** – Head of Plymouth Ocean Forecasting Centre of the University of Plymouth, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof. in Phys. Oceanogr., (Plymouth, Great Britain)
- Naum B. Shapiro** – Head Scientist Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)
- Mikhail V. Shokurov** – Head Scientist Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-1595-8281 (Sevastopol, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0001-7007-9496 (Sevastopol, Russia)
- Elizaveta V. Zabolotskikh** – Head Scientist Researcher of RSHU, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Scopus Author ID: 6506482460 (Saint Petersburg, Russian)
- Vladimir B. Zalesny** – Head Scientific Researcher of INM of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math.), prof., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Chief of Laboratory of FSBSI P.P. Shirshov IO of RAS, Chief Research Associate of FSBSI P.P. Shirshov IO of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- George Zodiatis** – Senior Researcher of Laboratory of Coastal and Marine Research of the Institute of Applied and Computational Mathematics, for Research and Technology Foundation – Hellas, Ph.D. (Oceanol.), ResearcherID: J-3032-2013 (Heraklion, Crete, Greece)

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 40, № 5. 2024

сентябрь – октябрь, 2024

### ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

- Башарин Д. В., Шокурова И. Г.** Продолжительные ветры над Черным морем и события атмосферного блокирования ..... 635

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

- Лаврентьева А. И., Леонов И. И., Соколихина Н. Н.** Повторяемость метеорологических факторов обледенения судов в Баренцевом море и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях изменяющегося климата ..... 651

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Гуров К. И.** Распределение и состав углеродородов в донных отложениях Камышовой бухты (Черное море) ..... 669
- Новотрясов В. В.** Возбуждение внутренних волн в неглубоком морском бассейне с открытым входом в условиях параметрического резонанса ..... 690

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ СИСТЕМ

- Мазова Р. Х., Мартыненко А. А., Куркин А. А.** Сравнительное численное моделирование волн цунами при землетрясении 1 января 2024 года на полуострове Ното, Япония..... 706
- Дымова О. А.** Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при различных схемах расчета адвективного переноса тепла и соли ..... 723
- Дивинский Б. В.** Численное исследование гидродинамического режима вод Таганрогского залива Азовского моря..... 738
- Мизюк А. И., Коротяев Г. К.** Особенности водообмена между бассейнами Черного и Мраморного морей по результатам численного моделирования с упрощенным представлением пролива..... 752

### СПУТНИКОВАЯ ГИДРОФИЗИКА

- Папкина А. С., Шибанов Е. Б., Калинин Д. В.** Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета ..... 766
- Королёв Ю. П.** Экспресс-метод оперативного прогноза цунами: возможность применения на Тихоокеанском побережье России..... 782



Материалы журнала доступны на условиях лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

## CONTENTS

Vol. 40, no. 5. 2024

September – October, 2024

### THERMOHYDRODYNAMICS OF THE OCEAN AND THE ATMOSPHERE

- Basharin D. V., Shokurova I. G.** Steady winds over the Black Sea and atmospheric blocking events ..... 635

### ANALYSIS OF OBSERVATIONS AND METHODS OF CALCULATING HYDROPHYSICAL FIELDS IN THE OCEAN

- Lavrenteva A. I., Leonov I. I., Sokolikhina N. N.** Frequency of meteorological factors of vessel icing in the Barents Sea and ice accretion on its coast in a changing climate ..... 651

### EXPERIMENTAL AND FIELD RESEARCH

- Soloveva O. V., Tikhonova E. A., Gurov K. I.** Distribution and composition of hydrocarbons in the bottom sediments of Kamyshovaya Bay (Black Sea) ..... 669
- Novotryasov V. V.** Excitation of internal waves in a shallow sea basin with an open inlet under conditions of parametric resonance ..... 690

### MATHEMATICAL MODELING OF MARINE SYSTEMS

- Mazova R. Kh., Martynenko A. A., Kurkin A. A.** Comparative numerical simulation of tsunami waves during the January 1, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan..... 706
- Dymova O. A.** Estimates of available potential energy budget in the Black Sea using different schemes for calculating heat and salt advective transport ..... 723
- Divinsky B. V.** Numerical study of hydrodynamic regime of the Taganrog Bay waters in the Sea of Azov ..... 738
- Mizyuk A. I., Korotaev G. K.** Features of water exchange between the Black and Marmara Sea basins based on the results of numerical simulation with a simplified representation of the strait..... 752

### SATELLITE HYDROPHYSICS

- Papkova A. S., Shybanov E. B., Kalinskaya D. V.** The effect of dust aerosol on satellite data from different color scanners ..... 766
- Korolev Yu. P.** Express method for operational tsunami forecasting: Possibility of its application on the Pacific coast of Russia..... 782




All the materials of the journal are available under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

Научная статья

УДК 551.513  
EDN: DUPHMR

## Продолжительные ветры над Черным морем и события атмосферного блокирования

Д. В. Башарин , И. Г. Шокурова*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия* dbasharin@rambler.ruПоступила в редакцию 22.01.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024;  
принята к публикации 13.07.2024.

### Аннотация

*Цель.* Целью работы является выделение и изучение случаев с продолжительными ветрами одного направления над акваторией Черного моря и анализ сопутствующих им условий в приземном слое атмосферы и средней тропосфере зимой (с декабря по март).

*Методы и результаты.* Рассматривались ситуации с экстремально продолжительными ветрами одного направления, когда преобладающий над морем ветер не менял направление в течение 5 сут и более. Анализ основывался на 6-часовых данных о скорости ветра на высоте 10 м, геопотенциальной высоте изобарической поверхности 500 гПа и приземном давлении из реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды за 1979–2021 гг. За анализируемый период были выделены 10 случаев с продолжительными ветрами. Большинство случаев составили ситуации с северо-восточными ветрами. Также обнаружены по одному случаю с восточным, северным и юго-западным ветром. Разложение по эмпирическим ортогональным функциям для совокупности ситуаций с этими ветрами показало, что распределение первых мод полей геопотенциальной высоты и приземного давления имеет пространственную структуру с устойчивой областью высокого давления над европейской территорией. Вклад этих мод в общую изменчивость составил 65 и 47% соответственно. Анализ обнаруженных ситуаций с устойчивыми ветрами показал, что во всех случаях с северо-восточными ветрами в средней атмосфере наблюдался процесс блокирования в виде квазистационарного антициклона, который располагался над Северной Европой/Скандинавским п-овом. В случае с северным ветром обширный высотный антициклон находился на севере европейской части России. Расчеты индекса блокирования Тибальди и Молтени подтвердили, что рассмотренные случаи продолжительных северо-восточных ветров и северного ветра соответствуют условиям блокирования. Устойчивый восточный ветер наблюдался, когда обширный антициклон в средней тропосфере активно смещался с севера Скандинавского п-ова в юго-восточном направлении. В случае с продолжительным юго-западным ветром в средней тропосфере присутствовал квазистационарный субтропический гребень высокого давления наряду с интенсивным западным переносом в регионе Европы, что создавало над акваторией Черного моря устойчивый ветер.

*Выводы.* Результаты проведенного анализа свидетельствуют, что рассмотренные случаи с устойчивыми северо-восточными и северными ветрами над акваторией Черного моря связаны с блокирующими процессами в атмосфере Европейского региона.

**Ключевые слова:** Черное море, Европейский регион, устойчивые ветры, высота изобарической поверхности 500 гПа, атмосферное блокирование

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

**Для цитирования:** Башарин Д. В., Шокурова И. Г. Продолжительные ветры над Черным морем и события атмосферного блокирования // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 635–650. EDN DUPHMR.

© Башарин Д. В., Шокурова И. Г., 2024

## Steady Winds over the Black Sea and Atmospheric Blocking Events

D. V. Basharin , I. G. Shokurova

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
 *dbasharin@rambler.ru*

### *Abstract*

*Purpose.* The purpose of this paper is to identify and study the cases of long-lasting steady winds of one direction over the Black Sea, and to analyze the accompanying conditions in the surface atmosphere and middle troposphere in winter (December – March).

*Methods and Results.* The situations with extremely long-lasting steady winds of persistent direction, namely when the prevailing wind over the sea does not change its direction for 5 days or more are considered. The analysis is based on the 6-hour data on wind speed at the 10 m height, the 500 hPa geopotential height and the surface pressure from the ERA5 reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts for 1979–2021. Within the analyzed period, 10 cases of steady winds were identified. In most cases it was a north-eastern wind. At the same time there were 3 recorded cases of the eastern, northern and south-western winds. The empirical orthogonal function analysis performed for a set of steady wind cases shows that distribution of the first modes of the geopotential height and surface pressure fields has a spatial structure with a stable high-pressure area over the European territory. The contribution of these modes to the total variability is 65 and 47%, respectively. Analysis of the revealed situations with steady winds shows that in all the cases with northern and north-eastern winds, atmospheric blocking in a form of a quasi-stationary anticyclone was observed in the middle atmosphere over the Northern Europe/Scandinavian Peninsula. In the case of northern wind, an extensive high-altitude anticyclone was located over the northern part of the European Russia. The values of the Tibaldi and Molteni blocking index confirm the fact that the considered cases of long-lasting north-eastern and northern winds correspond to the blocking conditions over the European region. A steady eastern wind was observed when the extensive anticyclone in the middle troposphere was actively moving from the north of the Scandinavian Peninsula to the south-east. In the case of a long-lasting south-western wind, a subtropical high-pressure ridge as well as an intense western transfer in the European region took place in the middle troposphere that generated a steady wind over the Black Sea.

*Conclusions.* The analysis results indicate that the considered cases with steady north-eastern and northern winds over the Black Sea are related to the blocking processes in the atmosphere of the European region.

**Keywords:** Black Sea, European region, steady winds, 500 hPa geopotential height, atmospheric blocking

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on theme FN NN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the ocean-atmosphere system that form the physical state variability of marine environment at various spatial and temporal scales”.

**For citation:** Basharin, D.V. and Shokurova, I.G., 2024. Steady Winds over the Black Sea and Atmospheric Blocking Events. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 593-608.



## Введение

В последние годы наблюдается тенденция к росту общего числа и интенсивности региональных гидрометеорологических аномалий на фоне глобальных климатических изменений<sup>1</sup> [1, 2]. Это подтверждается актуальными данными и расчетами глобальных и региональных климатических моделей, способных воспроизводить наблюдаемые тенденции изменения климата<sup>2</sup> [3], в том числе в регионе Черного моря [4, 5].

Известно, что длительные аномальные явления в приземном слое атмосферы часто связаны с квазистационарными ситуациями в средней тропосфере вследствие ее блокирования с типичной продолжительностью 5 сут и более [1, 3, 5, 6]. Блокирующие ситуации, наблюдающиеся в атмосфере средних широт Северного полушария, приводят не только к интенсивным региональным аномалиям в гидрометеорологических полях Европейского региона [5, 7–9]. Блокирование часто сопровождается изменением качества воздуха, например, аномально пониженным содержанием озона, особенно выраженным над Скандинавией и Аляской [10]. Экстремальные условия и региональные аномалии (в том числе вследствие блокингов в атмосфере) приводят к множеству негативных последствий, в частности, к повышению смертности населения [10, 11]. Вот почему их изучению в Европейско-Черноморском регионе посвящены многочисленные работы, количество которых намного превышает ссылки, приведенные в данной статье.

В настоящее время под блокингом понимается ситуация в атмосфере средних широт, когда гребень струйного течения становится особенно большим и образует в потоке отдельный антициклонический вихрь, создающий крупномасштабный устойчивый погодный режим (блокинг), блокирующий распространение волн Россби [2, 12]. В результате квазистационарного положения блокирующего антициклона происходит перенаправление типичных траекторий циклонов. При этом часто регионально устойчивый западный поток локально сменяется меридиональным потоком с длительностью от нескольких дней до нескольких недель<sup>3</sup> [6, 13, 14]. Структура блокинга может быть различной. Наиболее часто в исследованиях упоминаются блокинги омега-типа, по своей структуре напоминающие греческую букву  $\Omega$ , когда в центре расположен обширный антициклон, обтекаемый циклонами [15, 16], и дипольные блокинги, состоящие из антициклона и циклона, расположенного южнее антициклона [17].

Согласно работам [13, 17–19], типичный регион наиболее активного блокирования располагается в полосе 50–60° с. ш. с его максимальным количеством на западе Европейского региона, Скандинавии. В этом регионе блокирование хорошо проявляется в обширных аномалиях геопотенциальной вы-

---

<sup>1</sup> Climate change 2021: the physical science basis / V. Masson-Delmotte [et al.] // Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2021. 2339 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

<sup>2</sup> Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability / H. O. Pörtner [et al.] // IPCC Sixth Assessment Report. 2022. Netherlands, IPCC Publisher. 3675 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

<sup>3</sup> Regional climate extremes in Northern Eurasia associated with atmospheric blockings: Inter-annual variations and tendencies of change / I. I. Mokhov [et al.] // AGU Fall Meeting Abstracts. 2011. Vol. 2011. P. GC43F-06.

соты изобарической поверхности 500 гПа [20]. Учет такого распределения давления был использован при создании индексов блокирования [20], позволяющих по градиентам в поле геопотенциальной высоты определить наличие блокинга на конкретной долготе в конкретный срок. Для верификации расчетов режимов с блокированием в климатических моделях, реанализах и по данным наблюдений часто используют индекс блокирования Тибальди и Молтени<sup>4</sup> [9, 18–22].

Несмотря на большое число работ, анализирующих связь региональных климатических аномалий в Европейском регионе России с блокирующими процессами в атмосфере, для региона Черного моря таких исследований мало, и в основном они посвящены температурным аномалиям или осадкам/засухам [3, 5, 23]. Исследования причин возникновения аномальных ситуаций с продолжительными устойчивыми ветрами и их связи с блокингами в средней тропосфере не проводились. В то же время ветровой режим является одним из важных условий хозяйственной деятельности и жизнедеятельности человека. Знание ветрового режима и учет направления ветра важны при строительстве гидротехнических сооружений [24], прогнозировании ветрового волнения, сгонно-нагонных явлений [25, 26], апвеллингов в регионе Черного моря и штормовых условий [27, 28]. Кроме того, ветровой режим в значительной степени определяет характер циркуляции вод и изменение толщины перемешанного слоя [29, 30], а также влияет на региональные погодные условия [31]. Особый интерес представляют случаи, когда направление ветра устойчиво сохраняется в течение достаточно длительного времени. Это обуславливает актуальность подобных исследований. Поэтому основная цель работы – выявление ситуаций с продолжительными ветрами над Черным морем для холодного периода года и определение связи возникновения таких событий с крупномасштабными процессами в приземном слое и средней тропосфере.

### Материалы и методика

В работе использовались данные атмосферного реанализа *ERA5* ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) [32] за 1979–2021 гг.:

– 6-часовые данные о скорости ветра (м/с) на высоте 10 м над акваторией Черного моря;

– 6-часовые данные о приземном давлении (гПа) и о геопотенциале изобарической поверхности 500 гПа в районе, ограниченном координатами  $35\text{--}75^\circ$  с. ш.,  $10^\circ$  з. д. –  $100^\circ$  в. д.

Направление преобладающего над Черным морем ветра определялось для каждого 6-часового срока как направление вектора скорости, зональная и меридиональная компоненты которого получены на основе осреднения компонент скорости ветра по данным, попадающим на акваторию моря. Полученное направление сопоставлялось с одним из восьми основных географических направлений: северным (С), северо-восточным (СВ), восточным (В), юго-восточным (ЮВ), южным (Ю), юго-западным (ЮЗ), западным (З), северо-западным (СЗ).

---

<sup>4</sup> *Davini P.* Atmospheric blocking and winter mid-latitude climate variability : Tesi di Dottorato. Venezia : Universita Ca' Foscari, 2013. 141 p.

Из полученного временного ряда были выделены случаи с экстремально продолжительными ветрами, когда направление ветра не изменялось в течение двадцати 6-часовых сроков (т. е. 5 сут) и более. Для выделенных ситуаций дополнительно рассчитывались среднее направление ветра по всем узлам сетки  $\bar{\varphi}$  (°)

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \varphi_{ij}$$

и его отклонение  $\varphi^*$  (°) от направления географической привязки. Здесь  $\varphi_{ij}$  – направление ветра в каждом узле сетки;  $N$  – число узлов сетки по акватории моря;  $K$  – число 6-часовых сроков в ситуации с продолжительным ветром.

Для идентификации атмосферных условий, которые приводят к возникновению продолжительных ситуаций с устойчивыми ветрами, выполнялось разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) полей геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа и приземного давления для совокупности случаев с этими ветрами. Метод состоит в разложении начального поля  $F(x, t)$  по некоторым функциям  $X_n(x)$  с коэффициентами  $T_n(t)$  ( $n = 1 \dots N$ , где  $N$  – число сроков с устойчивыми ветрами)<sup>5</sup> [33]. При этом в основу определения неизвестных функций ставится лишь одно условие: сумма квадратов ошибок разложения по всем точкам данной совокупности поля должна достигать минимума для любого  $n$ .

Для проверки гипотезы о том, что возможной причиной возникновения ситуаций с продолжительными ветрами одного направления может быть блокирование в средней тропосфере, вычислялся индекс блокирования в даты случаев с такими ветрами. Расчет проводился по методике, предложенной Тибальди и Молтени [20]. Для каждой широты вычислялись северный  $GHGN$  (north geopotential height gradient) и южный  $GHGS$  (southern geopotential height gradient) градиенты (в м/°) между значениями геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа:

$$GHGN = \left[ \frac{Z(\phi_n) - Z(\phi_0)}{\phi_n - \phi_0} \right], \quad (1)$$

$$GHGS = \left[ \frac{Z(\phi_0) - Z(\phi_s)}{\phi_0 - \phi_s} \right], \quad (2)$$

где  $\phi_n = 80^\circ N + \delta$ ,  $\phi_0 = 60^\circ N + \delta$ ,  $\phi_s = 40^\circ N + \delta$ ,  $\delta = -5^\circ, 0^\circ, +5^\circ$ .

Блокирование имеет место в случае, когда хотя бы для одного значения  $\delta$  выполняются условия  $GHGS > 0$ ,  $GHGN \leq -10$ . Южный градиент  $GHGS$  определяет меру интенсивности блокирования, в то время как северный градиент  $GHGN$  исключает случаи ложного блокирования [20].

<sup>5</sup> Björnsson H., Venegas S. A. A manual for EOF and SVD analyses of climatic data // CCGCR Report. 1997. Vol. 97, iss. 1. P. 112–134.

Предварительно временные ряды геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа в каждой точке пространственной сетки сглаживались скользящим средним по 5 суткам (по двадцати 6-часовым срокам) для обеспечения поиска продолжительных событий блокирования.

### Результаты и их обсуждение

**Случаи с продолжительными ветрами одного направления над Черным морем.** В холодный период года было выделено 10 случаев с экстремально продолжительными ветрами, когда преобладающее над морем направление ветра не менялось в течение 5 сут и более (двадцать и более 6-часовых сроков) (таблица). Из выделенных случаев в 7 ситуациях преобладал северо-восточный (СВ) ветер, в одном случае северный (С) ветер, в одном случае – восточный (В) и еще в одном случае – устойчивый юго-западный (ЮЗ) ветер. Направление ветра  $\bar{\varphi}$  отклоняется от направления географической привязки в среднем на  $-6,6^\circ$  (таблица). Самые частые случаи – это случаи с северо-восточными устойчивыми ветрами, они составили  $\sim 62\%$  от всех выделенных ситуаций. Отметим, что северо-восточные ветры также имеют наибольшую за год повторяемость –  $18\%$  по многолетним данным [34, 35].

### Характеристики случаев с продолжительными ветрами над регионом Черного моря Characteristics of long-lasting wind cases over the Black Sea region

Случай / Case	Дата / Date	Направление ветра / Wind direction	Продолжительность, сут / Duration, day	$\Phi^*$ , °	Индекс блокирования / Blocking index	max GHGS, м/° / max GHGS, м/°	$V_{cp}$ , м/с / $V_{mean}$ , м/с	$V_{max}$ , м/с / $V_{max}$ , м/с
1	11–16.03.1986	СВ / NE	5,75	-8,2	+	7,0	7,0	11,6
2	01–07.01.1993	СВ / NE	6,50	4,3	+	5,0	9,7	16,6
3	07–14.12.1995	СВ / NE	8,75	-7,8	+	7,0	6,4	11,9
4	23–28.12.1995	ЮЗ / SW	5,00	-4,9	-	<0	10,3	16,0
5	14–19.01.2001	СВ / NE	6,50	-7,3	+	5,0	7,7	13,6
6	28.11–03.12.2002	В / E	6,25	1,5	-	<0	6,3	16,7
7	07–12.02.2008	СВ / NE	5,75	-7,8	+	7,0	7,1	12,6
8	28.01–02.02.2012	С / N	5,25	-9,1	+	11,0	7,4	14,8
9	08–13.02.2017	СВ / NE	5,25	-10,2	+	8,0	6,5	16,9
10	22–27.03.2020	СВ / NE	5,25	-4,9	+	6,8	6,1	16,4

Известно, что события блокирования в средней тропосфере не являются редкими. Согласно [16, 21, 36], суммарное число дней с атмосферным блокированием в Европе в среднем за зимний сезон года составляет 33 дня, при этом наблюдается около трех независимых эпизодов блокирования. Мы выделили всего 10 случаев с экстремально продолжительными ветрами дли-

тельностью 5 и более суток. Однако случаев с устойчивыми ветрами меньшей продолжительности (напр., 3–4 сут) может быть больше. В то же время не все возможные ситуации с достаточно устойчивым направлением ветра над морем, вызванные процессами блокирования, можно обнаружить, так как региональные атмосферные процессы могут искажать направление ветра в отдельные сроки.

Отметим, что, согласно результатам расчетов [21], по ряду климатических моделей, представленных в рамках шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в XXI столетии прогнозируется незначительное уменьшение среднего количества атмосферных блокингов в Европе в зимнее время <sup>1</sup>.

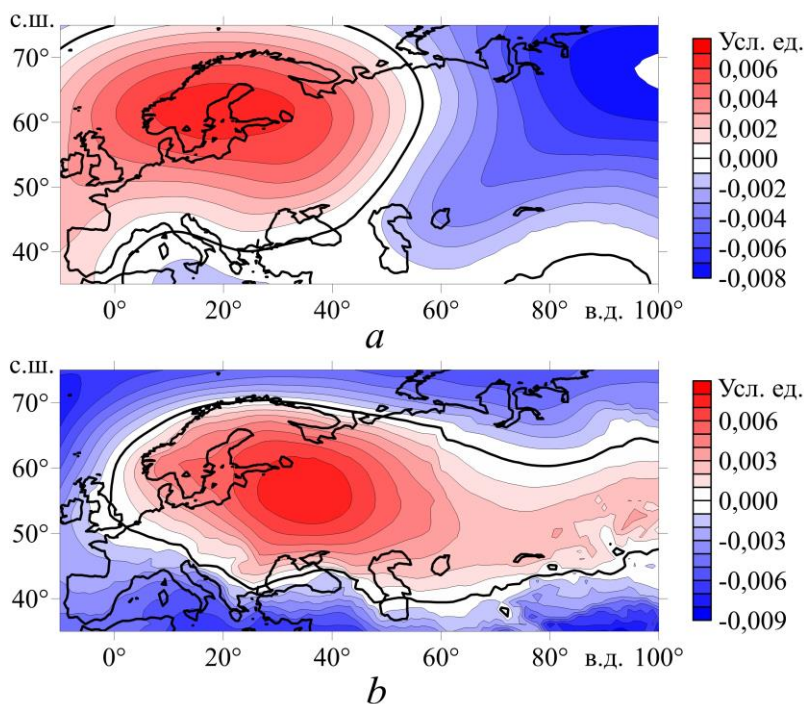
### **Крупномасштабные атмосферные условия для совокупности ситуаций с устойчивыми ветрами**

Метод ЭОФ позволил выделить лидирующие пространственные моды для случаев с устойчивыми ветрами в Черном море. В итоге анализа была получена пространственная структура первой моды геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа, содержащей 65% изменчивости (рис. 1, *a*). Распределение включает обширную область положительных аномалий геопотенциальной высоты, которая охватывает север Европы и простирается до Уральских гор/Каспийского моря. Центр антициклона располагается в районе Скандинавского п-ова, что характерно для положения блокирующего антициклона (блокинга).

Вклад следующих, со второй по пятую, пространственных мод геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа заметно меньше, он составил 9, 7, 6 и 4% соответственно.

Разложение набора полей приземного давления на эмпирические ортогональные функции имеет похожие результаты. В пространственной структуре первой моды обширная область положительных аномалий приземного давления во все сезоны располагается над Центральной Европой и европейской частью Российской Федерации (рис. 1, *b*), при этом первая мода определяет 47% изменчивости поля приземного давления. Вклад последующих мод, со второй по пятую, поля приземного давления для всех случаев устойчивых ветров составил в холодный сезон 21, 9, 5 и 4% соответственно. Отметим, что в силу большей пространственно-временной изменчивости приземных полей вклад лидирующей первой моды меньше, чем аналогичный в средней тропосфере.

Распределение первой моды, полученное для приземного давления, в целом соответствует типовому полю давления, характерному для северных, северо-восточных и восточных ветров над акваторией Черного моря [34, 37]. Ветры таких направлений возникают на периферии крупномасштабного антициклона, располагающегося к северу, северо-востоку от Черного моря.



**Р и с. 1.** Распределение первых мод аномалий геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500гПа (*a*) и поля приземного давления (*b*) для случаев с устойчивыми северными, северо-восточными и восточными ветрами в холодный период года

**Fig. 1.** Distribution of the first modes of the 500 hPa geopotential height anomalies (*a*) and the surface pressure field (*b*) for the cases of long-lasting northern, north-eastern and eastern winds in a cold season

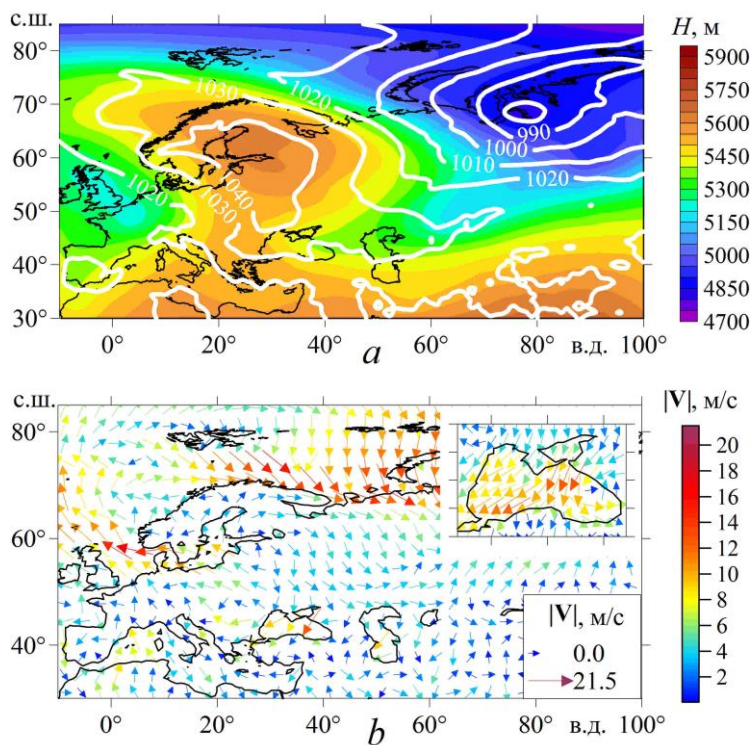
Известно, что для таких атмосферных условий зимой типичен вынос с высоких широт холодного/арктического воздуха на восточную/юго-восточную периферию антициклона<sup>4</sup>. Результаты [3] показывают, что блокирующие антициклоны, возникающие в регионе Центральной Европы, приводят к появлению отрицательных температурных аномалий воздуха вблизи северного побережья Черного моря. В то же время блокинги над северо-восточной частью Европы/Уралом формируют области положительных температурных аномалий, охватывающих Черноморский регион.

#### Атмосферные условия для случаев с устойчивыми ветрами разных направлений

Рассмотрим распределение геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа в средней тропосфере и приземного давления, а также выполнение условий блокирования для обнаруженных случаев устойчивых ветров различных направлений.

**Северо-восточный ветер.** Атмосферные условия в средней тропосфере практически для всех случаев с продолжительным северо-восточным ветром над Черным морем (случаи 1–3, 5, 7, 9, 10, таблица) удовлетворяют условиям блокирования, определяемым индексом Тибальди и Молтени. Это самое мас-

совое количество случаев с продолжительными ветрами одного направления. Максимальный южный градиент геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа, показывающий меру интенсивности блокирования, составляет 5–7 м/°. В этих случаях в распределении геопотенциальной высоты наблюдается малоподвижная блокирующая структура, имеющая омега-форму или близкую к ней (рис. 2).



**Р и с. 2.** Распределение геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа, приземного давления (гПа, изолинии белого цвета) (*a*) и поля ветра на высоте 10 м (*b*) для 07.12.1995, 12:00 (случай с продолжительным северо-восточным ветром)

**F i g. 2.** Distribution of the 500 hPa geopotential height, surface pressure (hPa, white isolines) (*a*) and wind field at the 10 m height (*b*) for 12.07.1995, 12:00 (a case of long-lasting north-eastern wind)

Анализ полей геопотенциальной высоты показал, что в случаях 1 (11–16.03.1986) и 2 (02–07.01.1993) центр блокирующего антициклона устойчиво располагался над Восточной Европой. В случаях 3 (07–14.12.1995) и 9 (08–13.02.2017) блокирующий циклон доминировал над Скандинавским п-овом. В случаях 5 (14–19.01.2001), 7 (07–12.02.2008) и 10 (22–27.03.2020) центр блокирующего антициклона находился над северо-западной частью Европы. В случаях 2, 5, 10 область высокого давления медленно вытягивалась в восточном направлении, где также выполнялись условия блокирования (формулы (1) и (2)). В перечисленных случаях в приземном слое присутствовала область высокого давления, на юго-восточной периферии которой преобладали северо-восточные ветры [34, 37].

Как пример, иллюстрирующий случаи с устойчивым северо-восточным ветром, на рис. 2 приведено распределение аномалий геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа (рис. 2, *a*) и распределение приземного давления (рис. 2, *b*) для случая 3, 07–14.12.1995 (таблица). Высотный блокирующий антициклон располагался над северной частью европейской территории России и Скандинавским п-овом. Структура блокинга в средней тропосфере имела хорошо выраженную форму в виде греческой буквы  $\Omega$  с областями низкого давления у основания с восточной и западной стороны. В это время над акваторией Черного моря дул северо-восточный ветер с максимальной скоростью 12 м/с (рис. 2, *b*, таблица), а аномалии приземной температуры достигали минус 6–7 °С по данным сайтов <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data>, [https://www1.wetter3.de/archiv\\_gfs\\_dt.html](https://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html).

**Северный ветер.** Случай с продолжительным северным ветром (случай 8 из таблицы) обнаружен для периода 29 января – 2 февраля 2012 г. В это время происходило устойчивое блокирование западного переноса в средней тропосфере над Северной Атлантикой и Евразией, характеризующееся наиболее интенсивным, по сравнению со всеми другими случаями, южным градиентом (формула (2)) в поле геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа (11 м/°). Процесс блокирования, начавшийся в третьей декаде января и продолжавшийся в феврале, сопровождался аномальными снегопадами и волнами холода в Европе и в европейской части России. Эти события описаны в многочисленных публикациях <sup>6</sup> [7, 38–40].

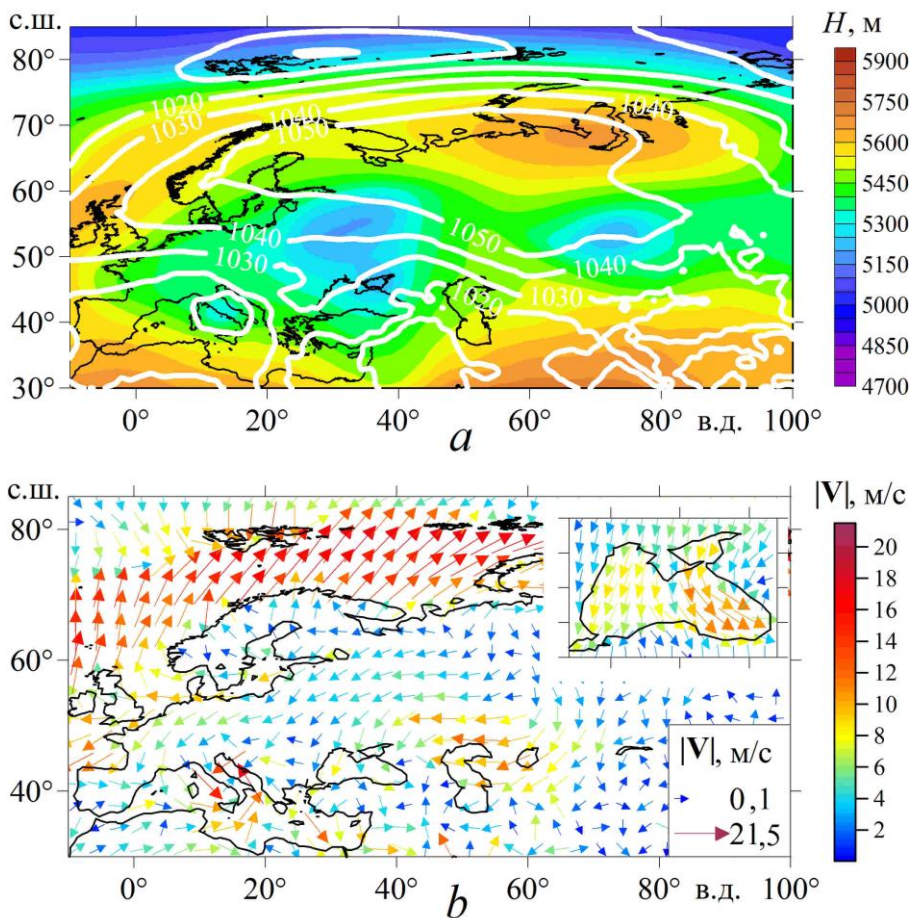
С середины января типичное западное перемещение атлантических циклонов над Центральной Европой нарушилось в результате усиления отрога Сибирского антициклона, вытягивающегося с юга Урала, его последующего продвижения на северо-запад и слияния с высотным гребнем над северо-восточной частью Атлантики [39, 40]. В нижнем слое тропосферы происходило экстремальное усиление положительных аномалий приземного давления [41]. К концу января – началу февраля обширный высотный блокирующий антициклон находился на севере европейской части России (рис. 3, *a*). На побережье Черного моря морозы сопровождалось сильным ветром (рис. 3, *b*). В рассматриваемый период 29 января – 2 февраля 2012 г. над акваторией Черного моря дул северный ветер со средней скоростью 7,4 м/с и максимальными значениями до 15 м/с.

Противоположная ситуация сложилась в это время в Арктическом регионе. Происходящая в эти месяцы перестройка макромасштабной циркуляции создала благоприятные условия для интенсивной адвекции теплого воздуха из Западной Европы и из Атлантического океана в центральную область Арктического бассейна (рис. 3, *b*). В Арктическом регионе среднемесячные аномалии температуры воздуха превысили 15°С [39]. Одновременно происходило вторжение полярного воздуха с севера Сибири на европейскую часть России, центральную и южную Европу (рис. 3, *b*), сопровождающееся сильными морозами. Одновременно волна холода наблюдалась и на востоке Азии [41].

---

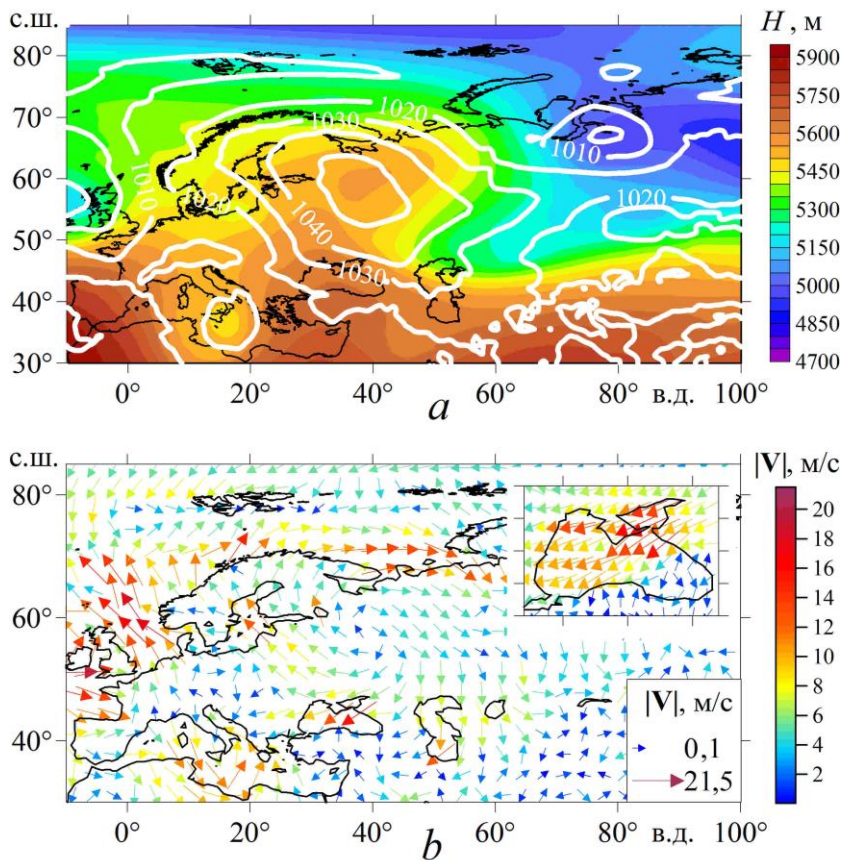
<sup>6</sup> *Grazzini F.* Cold spell prediction beyond a week: extreme snowfall events in February 2012 in Italy // ECMWF Newsletter. 2013. No. 136. P. 31–35.





**Рис. 3.** То же, что на рис. 2, для 01.02.2012, 12:00 (случай с продолжительным северным ветром)  
**Fig. 3.** The same as in Fig. 2, for 02.01.2012, 12:00 (a case of long-lasting northern wind)

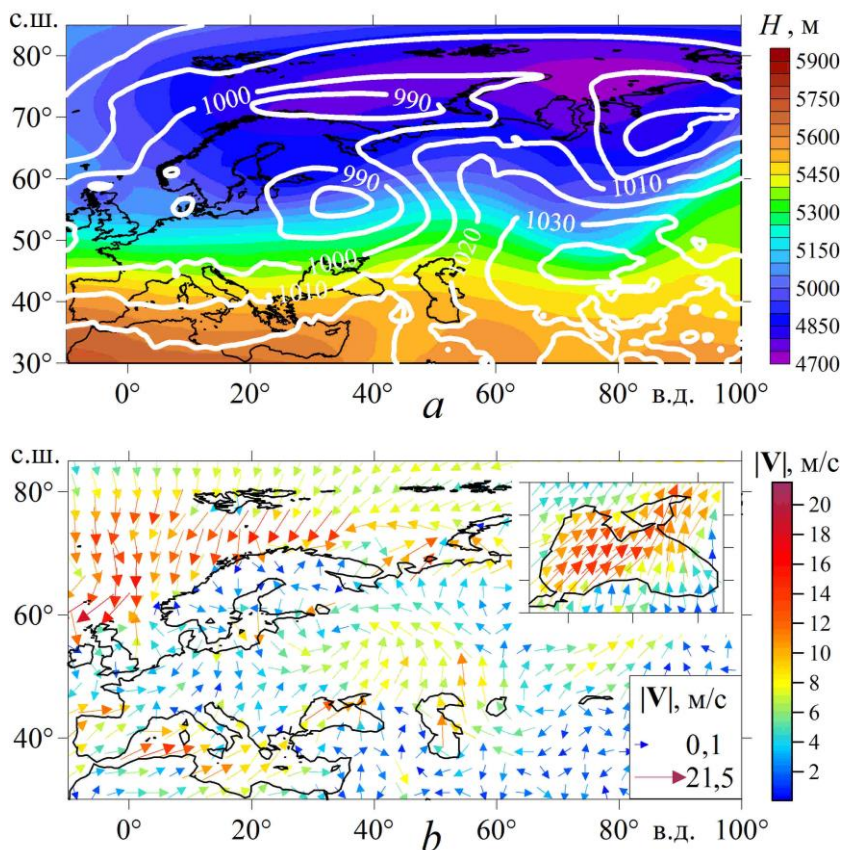
**Восточный ветер.** В случае с продолжительным восточным ветром (28.11–03.12.2002 г.) центр антициклона в средней тропосфере активно смещался начиная с 28 ноября в течение нескольких дней с севера Скандинавского п-ова в юго-восточном направлении, в центральную часть европейской территории России. Пространственная структура антициклона значительно видоизменялась. Так, напр., 1 декабря он соответствовал блокингу омега-типа (рис. 4, *a*), но быстро смещался и характеризовался южным градиентом меньше нуля, что не позволило идентифицировать его по критерию Тибальди и Молтени как блокирующий антициклон [20]. К концу периода антициклон располагался к северу/северо-востоку от Черного моря и далее постепенно двигался на восток. На его южной периферии, над акваторией Черного моря, преобладали восточные ветры (рис. 4, *b*). В целом над акваторией моря, по данным реанализа *ERA5*, в течение указанного периода преобладал устойчивый восточный ветер со средней скоростью  $\sim 6,3$  м/с и максимальными значениями, достигающими 17 м/с.



**Р и с. 4.** То же, что на рис. 2, для 01.12.2002, 06:00 (случай с продолжительным восточным ветром)

**Fig. 4.** The same as in Fig. 2, for 12.01.2002, 06:00 (a case of long-lasting eastern wind)

**Юго-западный ветер.** Случай 4 с устойчивым юго-западным ветром зафиксирован в период 23–28 декабря 1995 г. (рис. 5). Можно заметить, что в выявленных нами случаях с устойчивыми ветрами этот год фигурирует дважды (таблица). Зима 1995–1996 гг. относится к самой затяжной во второй половине XX в. с повышенным числом экстремумов, что частично связывается с усилением блокинговой активности<sup>3</sup> [14]. В течение этого периода начиная с 23 декабря холодная ложбина на северо-востоке Восточной Европы постепенно заполнялась, сдвигаясь на восток, а над югом Европы имел место интенсивный зональный перенос, который приносил атлантическое тепло в Черноморский регион. Этот перенос связан с прохождением циклона по северу Европы. Позднее, с 27 декабря над Черноморским регионом наблюдалось похолодание, связанное с прохождением холодного фронта другого подвижного циклона, который быстро перемещался по региону в восточном направлении. Кроме этого, на протяжении всего рассматриваемого периода присутствовал выраженный квазистационарный субтропический хребт высокого давления (рис. 5, *a*) и отмечался относительно высокий стабильный температурный градиент между севером и югом Европы.



**Р и с. 5.** То же, что на рис. 2, для 24.12.1995, 12:00 (случай с продолжительным юго-западным ветром)

**Fig. 5.** The same as in Fig. 2, for 24.12.1995, 12:00 (a case of long-lasting south-western wind)

Таким образом, можно заключить, что прохождение циклонов друг за другом по Европейскому региону, сопровождающееся интенсивным западным переносом воздушных масс, и стабильная полоса высокого давления в субтропических широтах (рис. 5, *a*) создавали над акваторией Черного моря условия для преобладания устойчивого юго-западного ветра (рис. 5, *b*). В целом над морем преобладал устойчивый юго-западный ветер со средней скоростью  $\sim 10,3$  м/с при максимальных значениях, достигающих 16 м/с.

### З а к л ю ч е н и е

В работе выделены и рассмотрены случаи с экстремально продолжительными ветрами над акваторией Черного моря в холодный период года (с декабря по март). Всего за 1979–2021 гг. было выделено 10 случаев ветров одного направления длительностью 5 сут и более. Для всех выделенных случаев были проанализированы атмосферные условия в приземном слое и средней тропосфере.

Для всех случаев с продолжительными северо-восточными ветрами и случая с северным ветром в атмосфере имели место события блокирования,

подтвержденные индексом блокирования. Как правило, присутствовал мало-подвижный высотный блокирующий антициклон, который располагался над северной частью Европы/Скандинавией или над севером европейской территории России, так что регион Черного моря оказывался на его юго-восточной периферии. В приземном слое такое положение антициклона сопровождалось северными и северо-восточными ветрами. Таким образом, атмосферные блокинги, в среднем располагающиеся над северной частью Европы, могут сопровождаться устойчивыми северо-восточными и северными ветрами над акваторией Черного моря.

Случай с юго-западным устойчивым ветром характеризуется отличительными атмосферными условиями по сравнению с предыдущими перечисленными случаями. В это время имел место интенсивный западный перенос при прохождении циклонов друг за другом по Европе. В субтропическом поясе присутствовал хорошо выраженный квазистационарный хребт высокого давления, и при этом существовал относительно высокий стабильный температурный градиент между севером и югом Европы. Такое распределение давления способствовало возникновению устойчивого юго-западного ветра над акваторией Черного моря.

В дальнейшем представляет интерес выявление и анализ событий с продолжительными ветрами для теплого времени года. Результаты данной работы могут быть использованы для изучения течений и ветровых волн в Черном море в периоды обнаруженных экстремально продолжительных ветров одного направления с применением численного моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мохов И. И., Семенов В. А.* Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 16–28. EDN VKQPRF.
2. Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector – a review / L. A. Kautz [et al.] // *Weather and Climate Dynamics*. 2022. Vol. 3, iss. 1. P. 305–336. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-305-2022>
3. Euro-Atlantic blocking events and their impact on surface air temperature and precipitation over the European region in the 20th century / G. Stankūnavičius [et al.] // *Climate Research*. 2017. Vol. 71, iss. 3. P. 203–218. <https://doi.org/10.3354/cr01438>
4. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // *Journal of Marine Systems*. 2004. Vol. 52, iss. 1–4. P. 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.002>
5. The relationship between atmospheric blocking and temperature anomalies in Turkey between 1977 and 2016 / B. Efe [et al.] // *International Journal of Climatology*. 2020. Vol. 40, iss. 2. P. 1022–1037. <https://doi.org/10.1002/joc.6253>
6. *Barriopedro D., García-Herrera R., Trigo R. M.* Application of blocking diagnosis methods to general circulation models. Part I: A novel detection scheme // *Climate dynamics*. 2010. Vol. 35. P. 1373–1391. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0767-5>
7. *Luo D., Yao Y., Feldstein S. B.* Regime transition of the North Atlantic Oscillation and the extreme cold event over Europe in January–February 2012 // *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142, iss. 12. P. 4735–4757. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00234.1>
8. Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010 / A. Schneiderit [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2012. Vol. 140, iss. 9. P. 2967–2981. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00249.1>

9. *Мохов И. И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 709–709. EDN ONFSBX.
10. The impact of synoptic weather on UK surface ozone and implications for premature mortality / R. Pope [et al.] // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11, iss. 12. 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124004>
11. *Wilby R. L.* A review of climate change impacts on the built environment // Built environment. 2007. Vol. 33, iss. 1. P. 31–45. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31>
12. The jet stream and climate change / M. Stendel [et al.] // Climate Change. Elsevier, 2021. P. 327–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00015-3>
13. *Хохлов В. Н., Романова А. В.* Повторяемость блокирующих ситуаций над Европой в начале 21-го века // Метеорология, климатология и гидрология. 2005. Т. 49. С. 82–88.
14. Interannual variations of the blocking high over the Ural Mountains and its association with the AO/NAO in boreal winter / C. Li [et al.] // Acta Meteorologica Sinica. 2012. Vol. 26, no. 2. P. 163–175. <https://doi.org/10.1007/s13351-012-0203-3>
15. A climatology of Northern Hemisphere blocking / D. Barriopedro [et al.] // Journal of Climate. 2006. Vol. 19, iss. 6. P. 1042–1063. <https://doi.org/10.1175/JCLI3678.1>
16. European temperature responses to blocking and ridge regional patterns / P. M. Sousa [et al.] // Climate Dynamics. 2018. Vol. 50. P. 457–477. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3620-2>
17. *Rex D. F.* Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate: part I // Tellus. 1950. Vol. 2, iss. 4. P. 275–301. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i4.8603>
18. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic / J. M. Wiedenmann [et al.] // Journal of Climate. 2002. Vol. 15, iss. 23. P. 3459–3473. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3459:TCOBAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3459:TCOBAF>2.0.CO;2)
19. *Pelly J. L., Hoskins B. J.* A new perspective on blocking // Journal of the Atmospheric Sciences. 2003. Vol. 60, iss. 5. P. 743–755. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2)
20. *Tibaldi S., Molteni F.* On the operational predictability of blocking // Tellus A. 1990. Vol. 42, iss. 3. P. 343–365. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x>
21. Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking / S. Bacer [et al.] // Weather and Climate Dynamics. 2022. Vol. 3, iss. 1. P. 377–389. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-377-2022>
22. Блокнги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам / И. И. Мохов [и др.] // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 582–586. EDN PYHRSD. <https://doi.org/10.7868/s0869565213110224>
23. *Кибальчич И. А., Полонский А. Б.* Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5–17. EDN TCUSEV.
24. Оценка состояния морской среды при экстремальных штормовых условиях в некоторых районах нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений у черноморского побережья Крыма / С. В. Довгая [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 276–286. EDN VBFSZJ.
25. Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis / S. Myslenkov [et al.] // Sustainability. 2021. Vol. 13, iss. 23. 13099. <https://doi.org/10.3390/su132313099>
26. *Харитонова Л. В., Иванча Е. В., Алексеев Д. В.* Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 79–90. EDN VBUSQN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-79-90>
27. *Суркова Г. В., Колтерманн К. П., Кислов А. В.* О методе прогноза штормовых условий при изменениях климата // Вестник Московского университета. Серия 5 : География. 2012. № 6. С. 25–31. EDN PUZPIL.

28. *Surkova G., Arkhipkin V., Kislov A.* Atmospheric circulation and storm events in the Black Sea and Caspian Sea // *Open Geosciences*. 2013. Vol. 5, iss. 4. P. 548–559. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0150-7>
29. *Stanev E. V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // *Oceanography*. 2005. Vol. 18, no. 2. P. 56–75. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>
30. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. EDN AIEJPU. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-449-468>
31. Анализ метеорологического режима в северо-западной части Черного моря по данным наблюдений на морской стационарной платформе / И. Г. Шокурова [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. Вып. 2. С. 41–51. EDN WKTQON.
32. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
33. *Багров Н. А.* Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // *Труды Центрального института прогнозов*. 1959. № 74. С. 3–24.
34. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : Морской гидрофизический институт РАН, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
35. *Шокуров М. В., Шокурова И. Г.* Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 13–26. EDN YLLPWM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-13-26>
36. *Воскресенская Е. Н., Коваленко О. Ю.* Блокирующие антициклоны в Европейском регионе и их изменчивость в связи с событиями Эль-Ниньо // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2016. № 1. С. 49–57. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-49-57>
37. *Шокурова И. Г., Кубряков А. А., Шокуров М. В.* Влияние долговременных изменений крупномасштабного поля приземного давления на ветровой режим и завихренность напряжения трения ветра в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 2. С. 179–194. EDN MQENUU. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-179-194>
38. *Demirtaş M.* The large-scale environment of the European 2012 high-impact cold wave: prolonged upstream and downstream atmospheric blocking // *Weather*. 2017. Vol. 72, iss. 10. P. 297–301. <https://doi.org/10.1002/wea.3020>
39. Блокирование западного переноса над Евразией зимой 2012 года и связанные с ним погодные аномалии / А. Д. Голубев [и др.] // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013. № 349. С. 188–213. EDN RDJAMD.
40. Синоптические механизмы зимнего потепления в Арктике / Е. К. Семенов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 9. С. 20–30. EDN UHOCSN.
41. *Wu B., Yang K., Francis J. A.* A cold event in Asia during January–February 2012 and its possible association with Arctic sea ice loss // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30, iss. 19. P. 7971–7990. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0115.1>

*Об авторах:*

**Башарин Дмитрий Викторович**, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 2145-1140**, **ResearcherID: J-9539-2018**, **Scopus Author ID: 6507420563**, **ORCID ID: 0000-0002-6389-8407**, [dbasharin@rambler.ru](mailto:dbasharin@rambler.ru)

**Шокурова Ирина Геннадьевна**, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7161-7467**, **ResearcherID: C-8223-2016**, **Scopus Author ID: 25822860800**, **ORCID ID: 0000-0002-3150-8603**, [igshokurova@mail.ru](mailto:igshokurova@mail.ru)

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.582  
EDN: KEILDP

## Повторяемость метеорологических факторов обледенения судов в Баренцевом море и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях изменяющегося климата

А. И. Лаврентьева<sup>1,✉</sup>, И. И. Леонов<sup>2</sup>, Н. Н. Соколичина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия

✉ lavrentevaai@my.msu.ru

Поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 17.06.2024;  
принята к публикации 17.07.2024.

### Аннотация

*Цель.* Целью работы является анализ региональных особенностей повторяемости гололедно-изморозевых отложений и метеорологических условий морского обледенения в районе Баренцева моря, а также многолетних трендов данных характеристик, наблюдаемых в условиях современных изменений климата.

*Методы и результаты.* Результаты исследования повторяемости гололедно-изморозевых отложений получены путем статистической обработки стандартных наблюдений на сети метеостанций, расположенных вблизи побережья и на островах Баренцева моря, за период с 1966 по 2022 г. Для оценок повторяемости морского обледенения был использован метод Д. Оверлэнда, основанный на расчете интенсивности брызгового обледенения с использованием данных о скорости ветра, температуре воздуха, температуре морской воды, а также температуре ее замерзания. В качестве исходных данных для метода Д. Оверлэнда использовался реанализ ERA5 за период с 1979 по 2022 г. По данным наблюдений получено среднегодовое число дней с атмосферными явлениями, во время которых могут формироваться опасные гололедно-изморозевые отложения различных видов. Проведена количественная оценка временных трендов среднегодового числа дней с такими явлениями. На основе обработки данных реанализа получено среднегодовое число дней с морским обледенением для акватории Баренцева моря. Выявлены области с наибольшей повторяемостью экстремального морского обледенения. Рассмотрены временные тенденции изменения повторяемости числа дней с морским обледенением различной интенсивности за период с 1979 по 2022 г.

*Выводы.* На побережье Баренцева моря в среднем за год наблюдается около трех дней с опасными гололедно-изморозевыми отложениями различных видов. С 1966 по 2022 г. количество таких явлений в среднем уменьшалось на 0,58 дней за 10 лет. Наибольшая повторяемость морского обледенения наблюдается в восточной части Баренцева моря и вблизи западного побережья Новой Земли, где среднее число дней с экстремальным обледенением составляет более 30 дней в год. В период с 1979 по 2022 г. наблюдалось как уменьшение среднего за год числа дней с обледенением до трех дней за год (южнее 75° с. ш. и западнее 50° в. д.), так и увеличение до трех дней за год (в северной и восточной частях Баренцева моря).

© Лаврентьева А. И., Леонов И. И., Соколичина Н. Н., 2024

**Ключевые слова:** Арктика, Баренцево море, изменения климата, климатические риски, опасные гидрометеорологические явления, обледенение, гололедно-изморозевые отложения, гололед, реанализ, ERA5

**Благодарности:** работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00047).

**Для цитирования:** Лаврентьева А. И., Леонов И. И., Соколикхина Н. Н. Повторяемость метеорологических факторов обледенения судов в Баренцевом море и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях изменяющегося климата // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 651–668. EDN KEILDР.

Original article

## Frequency of Meteorological Factors of Vessel Icing in the Barents Sea and Ice Accretion on its Coast in a Changing Climate

A. I. Lavrenteva<sup>1, ✉</sup>, I. I. Leonov<sup>2</sup>, N. N. Sokolikhina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Rosseti R&D Center, Moscow, Russia

✉ lavrentevaai@my.msu.ru

### Abstract

**Purpose.** The work is purposed at analyzing the regional characteristics of ice accretion frequency and meteorological conditions of vessel icing in the Barents Sea region, as well as long-term trends of these characteristics observed in the context of modern climate change.

**Methods and Results.** The results of studying the frequency of ice accretions are obtained by statistical processing of 3-hour observations at a network of weather stations located near the coast and on the islands of the Barents Sea for the period 1966–2022. The frequency of vessel icing is estimated using the D. Overland method which is based on calculating the spray icing intensity involving the data on wind speed, air temperature, sea water temperature, and its freezing point. The ERA5 reanalysis for 1979–2022 is used as the input data for the D. Overland method. The average annual number of days with the atmospheric phenomena during which dangerous ice accretions of different types can be formed, is obtained based on the observation data. The time trends in the average annual number of days with such phenomena are quantitatively evaluated. The reanalysis data processing has permitted to obtain the average annual number of days with vessel icing for the Barents Sea area. The regions of the highest frequency of extreme vessel icing are identified. The time trends in frequency of the changes in a number of days with vessel icing of different intensity are considered for the period 1979–2022.

**Conclusions.** On the Barents Sea coast, on average about three days per year with dangerous ice accretions of different types are observed. From 1966 to 2022, every 10 years the number of such phenomena decreased on average by 0.58 days. The highest frequency of marine icing is revealed in the eastern part of the Barents Sea and near the western coast of Novaya Zemlya where the average number of days with extreme icing exceeds 30 days per year. In course of the period 1979–2022, both a decrease in the average annual number of days with icing up to three ones per year (south of 75° N and west of 50° E) and their increase up to three days per year (in the northern and eastern parts of the Barents Sea) were observed.

**Keywords:** Arctic, Barents Sea, climate changes, climate risks, hazardous hydrometeorological phenomena, icing, ice accretion, glaze ice, reanalysis, ERA5

**Acknowledgements:** The research was carried out at the Lomonosov Moscow State University with the support of Russian Science Foundation (project No. 24-27-00047).

**For citation:** Lavrenteva, A.I., Leonov, I.I. and Sokolikhina, N.N., 2024. Frequency of Meteorological Factors of Vessel Icing in the Barents Sea and Ice Accretion on its Coast in a Changing Climate. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 609-625.



*Статья посвящена памяти  
Галины Вячеславовны Сурковой,  
выдающегося ученого в области  
климатологии, великолепного  
преподавателя и прекрасного учителя*

## **Введение**

В последние десятилетия неуклонно возрастает интерес к изменениям климата, происходящим в Арктическом регионе. Главным образом это связано с тем, что увеличение средних годовых температур воздуха в высоких широтах происходит значительно быстрее, чем в целом по земному шару. Также возрастает повторяемость некоторых опасных гидрометеорологических явлений <sup>1</sup> [1].

Предметом исследования в данной работе стали гидрометеорологические условия обледенения морских судов в акватории Баренцева моря и гололедно-изморозевые отложения на его побережье. Явления данного типа оказывают существенное влияние на развитие хозяйственной деятельности человека [2]. Атмосферное и морское обледенение существенно усложняет процесс разведки и добычи газа и нефти, а также их транспортировку [3, 4]. При интенсивном обледенении морские суда могут терять остойчивость и опрокидываться. Гибель судов при обледенении, а тем более угроза гибели в некоторых районах Мирового океана не столь редкое явление <sup>2</sup>. Предполагается, что морская деятельность будет активно развиваться в полярных и субарктических регионах как часть общего экономического развития, включая сферу транспорта, рыболовство и туризм [5]. В связи с этим изучение и понимание рисков, связанных с явлениями обледенения в Арктике, являются актуальной задачей.

На суше обледенение связано с атмосферными процессами. Первый процесс связан с выпадением осадков (*precipitation icing*), которое вызывает образование гололеда и отложение мокрого снега. Второй – обледенение в тумане, приводящее к образованию зернистой и кристаллической изморози (*in-cloud icing*). Наибольшую опасность представляют гололед, зернистая изморозь, а также отложения в виде мокрого снега [6].

В акватории морей наиболее значимым видом морского обледенения является обледенение в потоке морских брызг, образующихся при ударе волн о корпус судна. Такое обледенение называется брызговым. При совместном воздействии брызгового и атмосферного обледенения на судах образуется смешанное обледенение <sup>3</sup>. Согласно статистическим расчетам, в 90 % случаев лед на поверхности судна нарастает в результате брызгового обледенения [7].

Интенсивность обледенения зависит от различных гидрометеорологических условий, которые, в свою очередь, подчиняются атмосферным процессам. Нарастание льда усиливается с ростом волнения, вызываемого сильным ветром. Высокие скорости ветра могут быть связаны с мезомасштабными циклонами, имеющими короткое время жизни [8].

---

<sup>1</sup> Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. Санкт-Петербург : Научно-технологические исследования, 2022. 676 с.

<sup>2</sup> Аксютин Л. Р. Обледенение судов. Л. : Судостроение, 1979. 128 с.

<sup>3</sup> Качурин Л. Г., Смирнов И. А., Гашин Л. И. Обледенение судов. Л. : ЛПИ, 1980. 56 с.

В ходе ранее выполненных исследований получено, что на побережье и в акватории Баренцева моря за последние десятилетия наблюдается как тенденция к снижению повторяемости обледенения в одних районах, так и тенденция к ее увеличению в других [9]. Потепление климата не может означать однозначное уменьшение числа случаев обледенения судов. Необходимо анализировать совокупность факторов, которые приводят к нарастанию льда [10, 11].

Целью работы является анализ региональных особенностей повторяемости гололедно-изморозевых отложений и метеорологических условий морского обледенения в районе Баренцева моря, а также многолетних трендов данных характеристик, наблюдаемых в условиях современных изменений климата. В результате данной работы было получено пространственно-временное распределение гололедно-изморозевых отложений на побережье Баренцева моря за многолетний период с использованием данных наблюдений на метеорологических станциях. Получено пространственное распределение характеристик морского обледенения за многолетний период с использованием данных реанализа *ERA5*, оценены временные тренды количества дней с условиями, способствующими брызговому обледенению судов в Баренцевом море, для современного климата.

### **Материалы и методика исследования**

В данной статье рассматриваются различные типы гидрометеорологических явлений, приводящих к обледенению морских судов, а также морских сооружений на побережье и в акватории морей. В связи с этим были выбраны различные подходы к анализу этих явлений.

Основой анализа распространения гололедно-изморозевых отложений на побережье Баренцева моря были данные срочных наблюдений с метеорологических станций. Основные метеорологические параметры получены из открытого архива данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»<sup>4</sup>. В этом архиве содержатся данные срочных наблюдений на 521 станции за период с 1966 г. по текущее время. Перечень станций составлен на основании списка станций Росгидромета, включенных в Глобальную сеть наблюдений за климатом. В ходе исследования были отобраны метеорологические станции, расположенные на побережье Баренцева моря и на островах в его акватории. Дополнительно были отобраны несколько метеорологических станций, располагающихся на побережьях Белого, Гренландского и Карского морей.

Для оценки повторяемости, пространственного распределения и временных изменений для каждой метеорологической станции было получено среднее годовое число дней с атмосферными явлениями, потенциально приводящими к сильным гололедно-изморозевым отложениям. Днями с такими явлениями считались дни, в которые хотя бы один метеорологический срок соответствует определенному коду погоды.

За случаи гололеда принимались промежутки времени, в которые наблюдатель фиксировал замерзающие осадки. Отложения гололеда имеют большую

---

<sup>4</sup> Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России : база данных / О. Н. Булыгина, В. М. Веселов, В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова ; Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Электрон. дан. Москва, 2014. № гос. регистрации 2014620549.

плотность и прочность, поэтому потенциально опасными считались все сроки, во время которых наблюдались замерзающие осадки.

В коде КН-01 отсутствует разделение изморози на зернистую и кристаллическую. Поэтому для анализа использовались дни, соответствующие туману с отложением изморози. С целью отсеивания отложений кристаллической изморози были отобраны только те случаи изморози, которые наблюдались в диапазоне температуры воздуха от  $-10,3$  до  $-0,7$  °С и при скорости ветра 2 м/с и более. Ранее на основании обработки данных инструментальных наблюдений было показано, что 90 % опасных (диаметром более 50 мм) отложений зернистой изморози на территории России образуется именно в этом температурно-ветровом диапазоне [12]. Такая фильтрация данных позволяет убрать из выборки большую часть отложений в виде не представляющей серьезной опасности кристаллической изморози, которая образуется при слабом ветре и температуре воздуха ниже  $-10$  °С.

Фильтрация выборок производилась и для выявления дней с мокрым снегом, для которого в коде КН-01 не предусмотрено отдельного кода. Для выявления мокрого снега отбирались дни, в которые наблюдались осадки в виде умеренного непрерывного или сильного снега, выпадающие при температуре воздуха от 0 до  $0,6$  °С и скорости ветра не более 1 м/с. Такой диапазон ранее был обоснован авторами работы как наиболее благоприятный для образования опасных отложений мокрого снега [12].

В результате для каждой метеорологической станции было получено среднее за год количество дней с атмосферными явлениями, потенциально приводящими к образованию гололеда, зернистой изморози и мокрого снега, для периода с 1966 по 2022 г. Рассматривались только годы без пропусков наблюдений во время холодного периода. Для каждого из вида отложений были получены линейные временные тренды, которые проверялись на достоверность с использованием критерия Манна – Кендалла [13, 14]. Данный критерий использовался ранее другими авторами для оценки тенденций характеристик гололедно-изморозевых отложений [15].

Далее рассматривалось брызговое обледенение. Этот вид обледенения является наиболее интенсивным и представляет наибольшую опасность для морских судов. Вероятность обледенения и факторы, способствующие брызговому обледенению, можно определить с использованием различных статистических методов [16]. Большая часть методов основана на определении вероятности морского обледенения как совокупности заданных интервалов значений метеорологических параметров: скорости ветра, температуры воды и воздуха. Например, в методические указания по предупреждению угрозы обледенения судов, разработанные в ААНИИ для определения вероятности и интенсивности обледенения, включено сочетание скорости ветра и температуры воздуха <sup>5</sup>. Подобные методы используются и в рыбной промышленности <sup>6</sup>.

В данной работе для расчета интенсивности морского брызгового обледенения использовался метод, предложенный Д. Оверлэндом. Этот метод позво-

---

<sup>5</sup> Методические указания по предупреждению угрозы обледенения судов. Л., 1972. 81 с.

<sup>6</sup> Наставление по предупреждению аварий и борьбе за живучесть судов флота рыбной промышленности СССР. Л., 1983. 120 с.

ляет определить скорость обледенения морских судов с использованием индекса обледенения [17]. Помимо скорости ветра и температуры воздуха, в данном индексе обледенения дополнительно учитываются значения температуры морской воды, а также температуры ее замерзания.

Расчетная формула вычисления индекса обледенения  $PPR$ , имеет следующий вид:

$$PPR = \frac{V_a(T_f - T_a)}{1 + 0,4(T_w - T_f)},$$

где  $PPR$  – показатель обледенения, пропорциональный его интенсивности;  $V_a$  – скорость ветра, м/с;  $T_f$  – температура замерзания морской воды;  $T_a$  – температура воздуха и  $T_w$  – температура воды, °С.

Полученным значениям индекса обледенения  $PPR$  соответствует различная интенсивность скорости обледенения (табл. 1).

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Соотношение индекса обледенения  $PPR$  и скорости нарастания льда  $IR$**   
**Ratio between the icing index  $PPR$  and the icing rate  $IR$**

Параметр / Parameter	Обледенение по степени опасности / Degree of icing hazards				
	Легкое / Light	Умеренное / Moderate	Тяжелое / Heavy	Экстремальное / Extreme	Особенно экстремальное / Particularly extreme
$PPR$ , (м·°С)/с / $PPR$ , (m·°C)/s	> 0	> 20,6	> 45,2	> 70,0	> 83,0
Скорость обледенения $IR$ , см/час / Icing rate $IR$ , cm/h	> 0	> 0,7	> 2,0	> 4,0	> 5,3

Существует эмпирическая формула пересчета параметра обледенения в скорость обледенения  $IR$  (см/час):

$$IR = A(PPR) + B(PPR)^2 + C(PPR)^3,$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – эмпирические константы ( $A = 2,73 \cdot 10^{-2}$ ,  $B = 2,91 \cdot 10^{-4}$ ,  $C = 1,84 \cdot 10^{-6}$ ).

В качестве метеорологических данных для построения полей скорости обледенения по методу Д. Оверлэнда были использованы данные реанализа  $ERA5$ , которые доступны на регулярных сетках широты и долготы с разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  [18]. Расчеты проводились для акватории Баренцева моря с 1979 по 2022 г. с периодичностью 1 ч.

Для каждого срока в период с 1979 по 2022 г. был рассчитан индекс  $PPR$ . Индекс рассчитывался только для ячеек сетки, в которых присутствовали данные о температуре поверхности моря (соответствующие «морским» ячейкам), а также для ячеек, в которых морской лед занимал менее 50 % площади ячейки. Если доля морского льда в ячейке составляла более 50 %, то предполагалось, что брызговое обледенение отсутствует.

Далее были рассчитаны средние месячные и средние годовые значения количества дней с обледенением морских судов различной интенсивности (все случаи обледенения и экстремальное обледенение). Днем с обледенением считался любой день, во время которого хотя бы в один из 24 сроков ежечасных данных реанализа наблюдалось обледенение заданной интенсивности. Для выявления всех дней с обледенением задавалась интенсивность  $PPR > 0$ , для дней с экстремальным обледенением  $PPR > 83$ .

После оценки средних значений с использованием метода наименьших квадратов были получены многолетние линейные тренды количества дней с морским обледенением. Полученные тренды проверялись на достоверность с использованием критерия Манна – Кендалла [13, 14].

### Результаты и обсуждение

Полученные данные о среднем за год числе дней с атмосферными явлениями, которые могут приводить к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений на территории побережья Баренцева моря и в его акватории, представлены в табл. 2.

На основании этих данных построена карта-схема повторяемости числа дней с опасными явлениями каждого типа. На карте-схеме для каждой метеорологической станции представлена круговая диаграмма, показывающая долю среднего годового количества случаев атмосферных явлений, которые становятся причиной образования гололедно-изморозевых отложений различного вида. Полученные данные указывают на то, что в рассматриваемом регионе нельзя выделить преобладание какого-либо одного атмосферного явления (рис. 1).

Наибольшая повторяемость туманов с отложением изморози, формирующихся при достаточной скорости ветра и температурном диапазоне, благоприятном для формирования зернистой изморози, наблюдается в юго-восточной части Баренцева моря. Также туман с отложением изморози часто наблюдается на нескольких отдаленных от побережья метеорологических станциях («Мурманск» и «Полярное»).

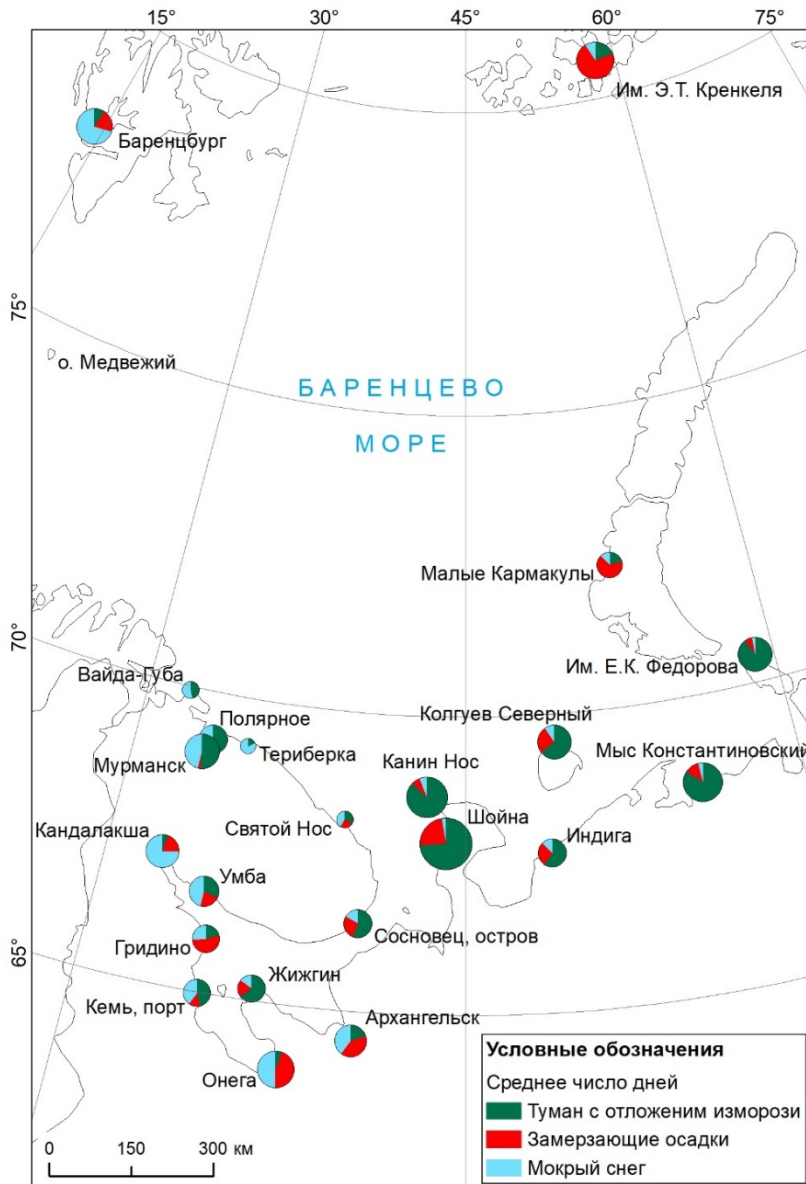
Пространственная картина распределения числа дней с замерзающими осадками крайне неоднородна. Однако можно сделать некоторые предположения относительно этого распределения. Гололед реже всего наблюдается на мысе Константиновском и станции им. Е. К. Федорова. Это метеорологические станции, расположенные на юго-востоке Баренцева моря и в проливе Карские Ворота со стороны Карского моря соответственно. В данном месте наблюдается низкая повторяемость теплых фронтов с термической стратификацией по типу «теплого носа» с характерным приподнятым слоем теплого воздуха, приводящего к образованию замерзающих осадков. Низкая повторяемость замерзающих осадков в районе Мурманска может быть связана с непосредственной близостью Мурманского прибрежного теплого течения, которое способствует существованию теплого нижнего слоя атмосферы, препятствующего образованию замерзающих осадков.

Т а б л и ц а 2  
Table 2

**Среднее годовое число дней с потенциально опасными явлениями погоды (СЧ) и значения линейного тренда (дней / 10 лет) для периода с 1966 по 2022 г. Average annual number of days with potentially hazardous weather events (AN) and linear trend values (days / 10 years) for the period 1966–2022**

Метеорологическая станция / Weather station	Туман с отложением изморози / Rime fog		Замерзающие осадки / Freezing precipitation		Мокрый снег / Wet snow		Все явления / All events	
	СЧ / AN	тренд / trend	СЧ / AN	тренд / trend	СЧ / AN	тренд / trend	СЧ / AN	тренд / trend
Им. Э. Т. Кренкеля / Krenkel	0,72	<b>-0,28</b>	2,72	<b>-0,97</b>	0,35	-0,01	3,79	<b>-1,26</b>
Баренцбург / Barenzburg	0,33	0,08	0,71	0,14	2,50	0,18	3,54	0,40
Малые Кармакулы / Malye Karmakuly	0,37	<b>-0,20</b>	1,19	<b>-0,65</b>	0,23	-0,03	1,79	<b>-0,88</b>
Им. Е. К. Федорова / Fedorov	2,93	-0,33	0,23	-0,08	0,09	-0,04	3,25	-0,45
Вайда-Губа / Vaida Guba	0,38	0,11	0	0	0,43	-0,05	0,81	0,06
Полярное / Polyarny	1,47	-0,01	0	0	0,84	0,01	2,31	0
Териберка / Teriberka	0,12	-0,03	0	0	0,55	-0,08	0,67	-0,11
Колгуев Северный / Kolguyev Severny	2,06	<b>-0,27</b>	0,81	<b>-0,27</b>	0,31	-0,06	3,18	<b>-0,60</b>
Мурманск / Murmansk	1,71	-0,19	0,08	0	1,51	-0,04	3,30	<b>-0,24</b>
Святой Нос / Svyatoy Nos	0,25	<b>-0,17</b>	0,19	-0,06	0,31	-0,01	0,75	<b>-0,24</b>
Канин Нос / Kanin Nos	4,06	-0,17	0,32	0,11	0,28	0,06	4,66	0
Кандалакша / Kandalaksa	0,16	-0,02	0,63	0,1	2,33	<b>0,38</b>	3,12	<b>0,46</b>
Шойна / Sojna	5,52	0,18	1,73	-0,16	0,2	-0,03	7,45	-0,02
Индига / Indiga	1,33	<b>-0,61</b>	0,63	0	0,27	-0,07	2,23	<b>-0,67</b>
Умба / Umba	0,81	-0,04	0,56	<b>-0,33</b>	1,17	<b>0,31</b>	2,54	-0,06
Сосновец, остров / Sosnovets island	1,24	<b>-0,41</b>	0,59	<b>-0,24</b>	0,37	-0,12	2,2	<b>-0,77</b>
Гридино / Gridino	0,43	<b>-0,26</b>	1,11	<b>-0,61</b>	0,54	-0,08	2,08	<b>-0,95</b>
Жижгин / Zizgin	1,38	<b>-0,37</b>	0,4	<b>-0,18</b>	0,32	<b>-0,11</b>	2,10	<b>-0,65</b>
Кемь, порт / Kem port	0,95	0,09	0,27	-0,02	0,82	0,12	2,04	0,18
Архангельск / Arhangelsk	0,57	<b>-0,17</b>	1,12	-0,01	1,12	<b>0,23</b>	2,81	0,06
Онега / Onega	0,21	<b>-0,07</b>	1,68	<b>0,37</b>	1,88	-0,02	3,77	0,28
Мыс Константиновский / Konstantinovsky cape	3,60	<b>-0,28</b>	0,50	-0,09	0,17	-0,03	4,27	0,33

Пр и м е ч а н и е. Значимые тренды выделены жирным шрифтом.  
Note. Significant trends are in bold.



**Р и с. 1.** Карта-схема среднего годового числа дней с представляющими опасность атмосферными явлениями за период с 1966 по 2021 г. по данным визуальных наблюдений

**Fig. 1.** Map of the average annual number of days with hazardous atmospheric phenomena for the period 1966–2021 based on visual observations

Более четко прослеживаются пространственные особенности повторяемости мокрого снега. Известно, что отложения мокрого снега чаще всего начинают образовываться при температуре воздуха от  $-0,1$  до  $0,3$  °C и при низкой скорости ветра (от 1 до 4 м/с) или при штиле [12]. Это связано с физическими свойствами снега: снежинки имеют большой размер и высокую парусность,

они легко сдуваются сильным ветром с предметов, на которых происходит обледенение. Поэтому для образования опасных отложений в виде мокрого снега необходимо, чтобы ветер на протяжении всей фазы нарастания был не слишком сильным. С этим фактом связано то, что наибольшая повторяемость опасных отложений мокрого снега наблюдается в акватории Белого моря, а также на некоторых метеорологических станциях с высокой повторяемостью околонулевой температуры воздуха и низкой скорости ветра из-за нахождения в орграфически защищенных формах рельефа. Например, «Баренцбург» располагается на побережье залива Ис-фьорд, а метеорологическая станция «Вайда-Губа» располагается в губе с соответствующим названием. «Мурманск» и «Полярное» также располагаются в Кольском заливе.

Основное внимание в работе уделено явлениям, которые могут приводить к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений. Как уже было отмечено в разделе «Материалы и методика исследования», в ходе работы применялась фильтрация данных основных наблюдений с учетом полученных ранее диапазонов температуры воздуха и скорости ветра, характерных для опасных гололедно-изморозевых отложений каждого вида.

К процессу фильтрации данных можно подходить по-разному. Использование более строгих критериев приводит к существенному уменьшению отобранных случаев. Так, например, при отборе случаев мокрого снега допускалось, что отложения мокрого снега могут формироваться при скорости до 1 м/с включительно. Если бы предполагалось, что опасные отложения мокрого снега могли образовываться только при штиле, количество отобранных случаев мокрого снега сократилось бы в три раза. Напротив, если бы потенциально опасными снегопадами считались случаи выпадения снега при температуре воздуха от  $-2$  до  $2$  °C при любой скорости ветра, то среднее число дней с мокрым снегом в районе Баренцева моря увеличилось бы в 45 раз – с 0,75 до 33 дней в году.

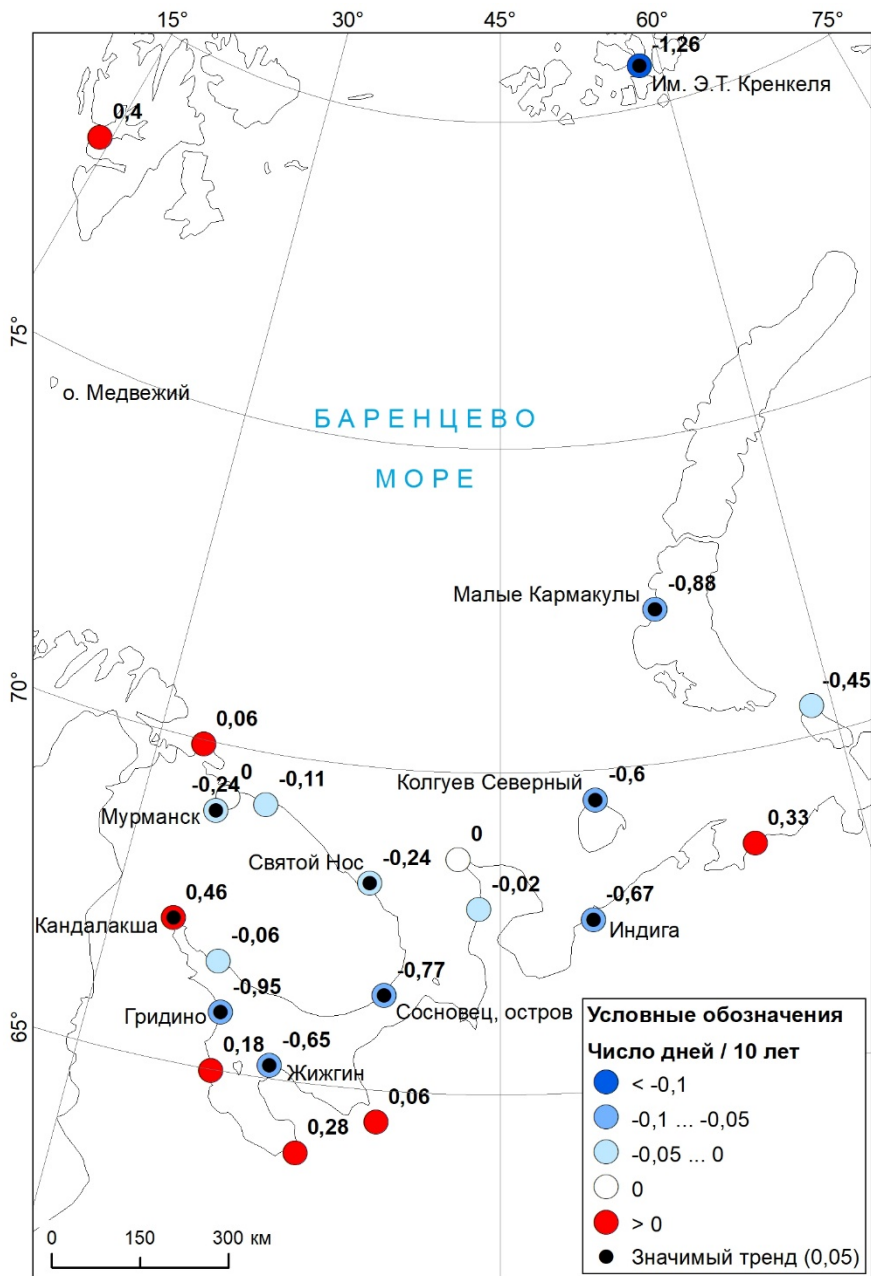
То же самое касается туманов с образованием изморози. Для ужесточения критериев отбора можно повышать скорость ветра, увеличивая плотность потока переохлажденных капель тумана и тем самым оставляя случаи наиболее интенсивных отложений зернистой изморози и исключая все большую часть случаев кристаллической.

В табл. 2 приведены оценки линейных трендов для числа дней с атмосферными явлениями, приводящими к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений за период с 1966 по 2022 г. Отдельно приведены оценки для туманов с отложением изморози, замерзающих осадков и мокрого снега. Также представлены оценки тренда для числа дней со всеми явлениями. Тест Манна – Кендалла [13, 14] показал, что для 5%-ного уровня значимости некоторые полученные тренды оказались надежными.

Показано, что значимые тренды числа дней с изморозью имеют отрицательные значения от  $-0,61$  до  $-0,07$  дней за десятилетие. Число дней с замерзающими осадками тоже имеет тенденцию к сокращению. Линейные тренды числа дней с мокрым снегом значимы только на 4 станциях из 22. В целом тренды числа дней с мокрым снегом можно оценить как околонулевые слабозначимые с отдельными существенными положительными изменениями на метеорологических станциях «Кандалакша», «Умба» и «Онега».



Так как в данной работе тенденции изменения числа дней с атмосферными явлениями, вызывающими образование гололедно-изморозевых отложений, рассматривались в контексте климатических рисков в Арктике, целесообразно оценить тренд общего количества таких явлений.



**Р и с. 2.** Карта-схема временных трендов (число дней / 10 лет) повторяемости представляющих опасность атмосферных явлений за период с 1966 по 2022 г.

**F i g. 2.** Map of time trends (number of days / 10 years) of the hazardous atmospheric phenomena frequency for the period 1966–2021

На рис. 2 представлена карта-схема, на которой для каждой метеорологической станции показано значение линейного тренда суммарного числа дней с наблюдением всех потенциально опасных атмосферных явлений за период с 1966 по 2022 г. Для удобства показан тренд числа дней за 10 лет.

Из карты следует, что отрицательные тренды наблюдаются в основном на территориях, выходящих к побережьям Белого и Баренцева моря. Положительные тренды, как правило, наблюдаются на метеорологических станциях, имеющих более континентальное расположение. Почти все значимые тренды имеют отрицательный знак. Исключением является метеорологическая станция «Кандалакша», где наибольший вклад в положительный тренд вносит мокрый снег.

В ранее опубликованных работах были оценены тренды среднегодового количества дней с гололедом на территории России [19]. В целом для Атлантической Арктики был получен слабый отрицательный тренд ( $-0,2$  дня/год) числа дней с замерзающим дождем. Полученный в данной работе отрицательный тренд количества дней с опасными явлениями гололеда хорошо согласуется с приведенными ранее оценками.

Несмотря на то что в настоящей работе средняя оценка приведена только для значимых трендов, нельзя сделать однозначный и достоверный вывод о многолетних изменениях повторяемости потенциально опасных явлений атмосферного обледенения в рассматриваемом регионе. Это связано с тем, что полученные значения линейных трендов отличаются большим разбросом, а исходные данные визуальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями – высокой степенью неоднородности.

Тенденции современных изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России, полученные с использованием инструментальных наблюдений, по данным доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации, показывают, что для квазиоднородной климатической области Атлантической Арктики наблюдается незначимый положительный тренд количества дней с гололедом и значимый тренд количества дней с отложениями мокрого снега <sup>7</sup>.

Таким образом, в районе Баренцева моря можно ожидать около трех дней в году, когда будут наблюдаться атмосферные явления, приводящие к образованию сильных гололедно-изморозевых отложений. Вероятно, число дней с атмосферным обледенением будет уменьшаться в среднем на 0,2 дня за десять лет. Сокращение числа дней с обледенением и уменьшение его влияния на морские суда и инфраструктуру морских портов можно считать положительным эффектом изменения климата в Арктике. Однако, несмотря на существенную долю значимых трендов, к таким оценкам нужно относиться с осторожностью, учитывая сложность проведения наблюдений за атмосферными явлениями, влияющую на качество обработанных данных, а также на климатическую изменчивость данного региона.

Подход, использующий данные основных срочных наблюдений, может применяться к оценке изменений повторяемости гололедно-изморозевых отложений различной интенсивности, в первую очередь для тех регионов, где

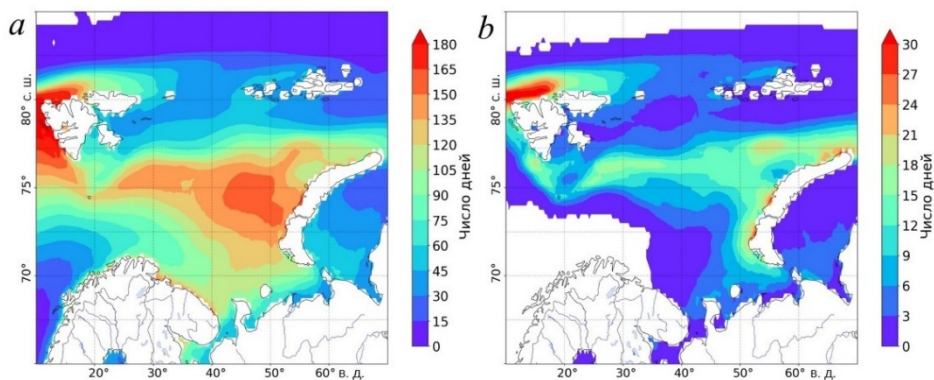
---

<sup>7</sup> Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Москва : Росгидромет, 2022. 110 с.

отсутствуют данные инструментальных наблюдений. Однако стоит отметить, что данная методика нуждается в проверке на территориях, находящихся и в других климатических областях России.

Далее в работе рассматривается климатология брызгового обледенения в акватории Баренцева моря. В данном случае обледенением называется совокупность метеорологических факторов, которая способствует образованию обледенения согласно методу Д. Оверлэнда. Получена повторяемость обледенения судов в Баренцевом море в период с 1979 по 2022 г. Наибольшие значения среднего числа дней с обледенением относятся к западу от островов Шпицберген и Новая Земля, а также к северному побережью Кольского полуострова (рис. 3, *a*). Так, в среднем за год в этих районах наблюдается более 150 дней с обледенением.

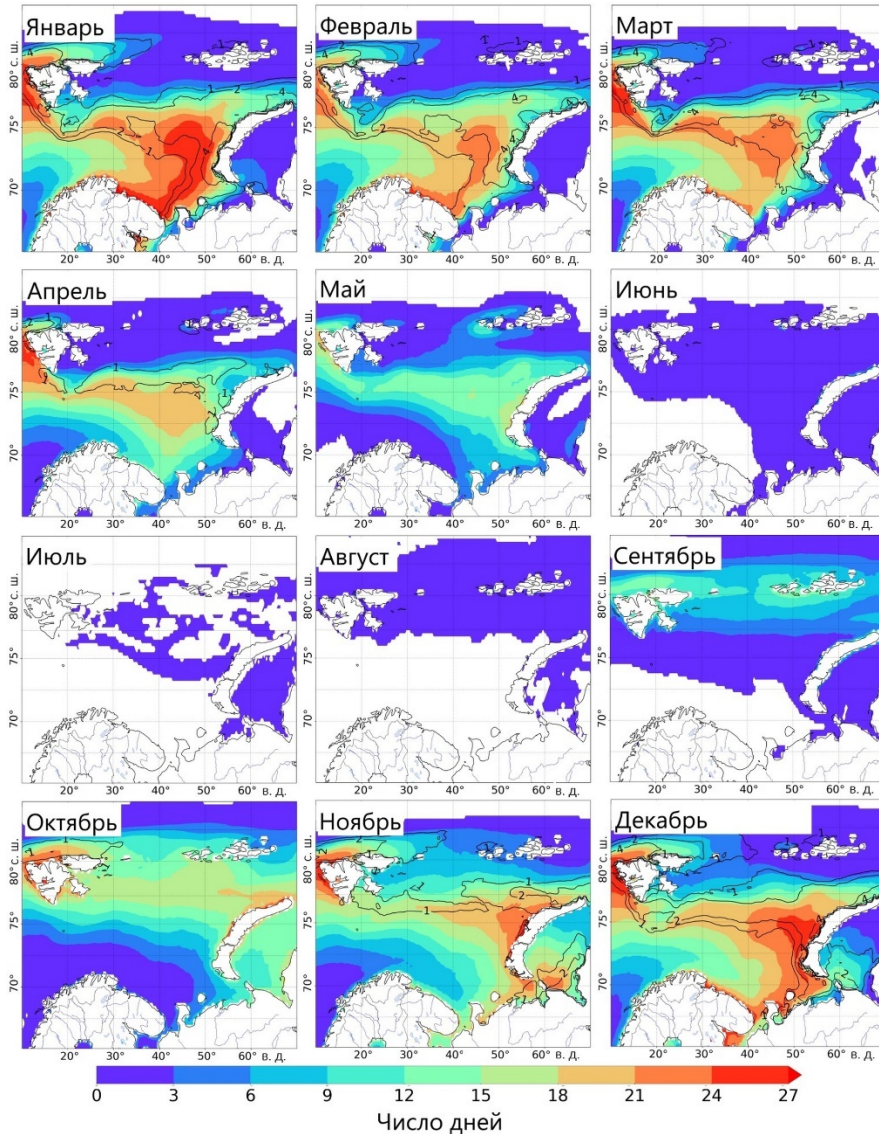
Вдоль побережья материка среднее за год число дней с обледенением имеет неоднородное распределение. Вдоль береговой линии Архангельской области и Ненецкого автономного округа обледенение судов наблюдается реже, чем вдоль береговой линии Мурманской области. Абсолютные высоты над уровнем моря на Кольском п-ове больше, что может приводить к сильным кatabатическим ветрам и увеличению числа случаев с обледенением. Под влиянием теплого Норвежского течения вероятность обледенения судов существенно снижается, его вклад прослеживается до 40° в. д. В этом случае в течение года в среднем наблюдается не более 120 дней с нарастанием льда на поверхности судна в результате брызгового обледенения. Наибольшие значения среднего числа дней с экстремальным обледенением имеют сходное распределение (рис. 3, *b*). Так, наиболее часто экстремальное обледенение встречается к западу от архипелага Шпицберген и Новой Земли. В этих районах число дней с условиями для экстремального обледенения примерно в шесть раз меньше среднего числа дней с обледенением в целом и составляет от 21 до 30 дней в году. К северу от островов повторяемость обледенения относительно невелика вследствие установления продолжительного ледового покрова, в среднем за год наблюдается не более 10 дней с обледенением судов. А к югу от островов Шпицберген за счет теплого Норвежского течения наблюдаются более высокие температуры, что также приводит к меньшей повторяемости обледенения.



**Р и с. 3.** Среднегодовое число дней с обледенением (*a*) и с экстремальным обледенением ( $PPR > 83$ ) (*b*) судов в Баренцевом море за период с 1979 по 2022 г.

**F i g. 3.** Average annual number of days with icing (*a*) and extreme icing ( $PPR > 83$ ) (*b*) of vessels in the Barents Sea for the period 1979–2022

Далее рассмотрим годовой ход числа дней с брызговым обледенением в Баренцевом море (рис. 4). Для каждого месяца года построены карты числа дней с морским обледенением. Результаты показали, что наибольшее количество дней с обледенением наблюдается с октября по апрель. На наиболее благоприятных для обледенения территориях это явление в среднем наблюдается почти каждый день (более 27 дней в месяц). Наименьшее количество дней с обледенением наблюдается в июле.

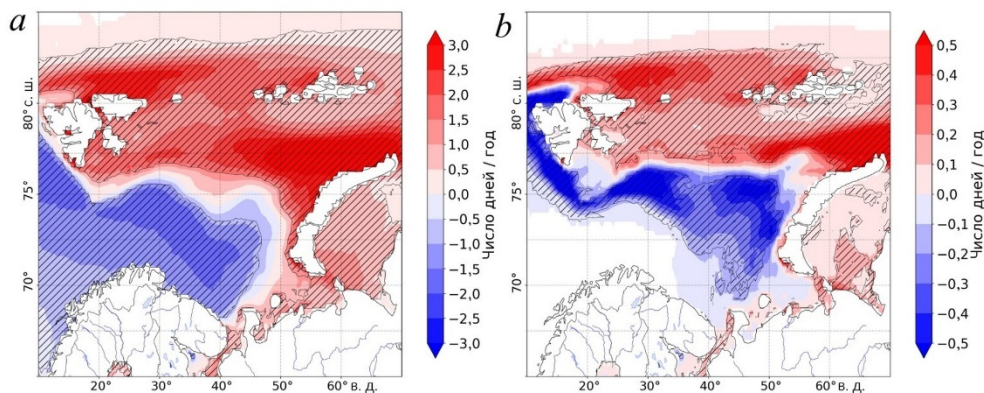


**Р и с. 4.** Среднее число дней с обледенением судов в Баренцевом море за период с 1979 по 2022 г. для каждого месяца. Черными изолиниями показано число дней с экстремальным обледенением ( $PPR > 83$ ) за месяц

**Fig. 4.** Average number of days with vessel icing in the Barents Sea for each month during the period 1979–2022. Black isolines show the number of days with extreme icing ( $PPR > 83$ ) per month

На рис. 4 также показано среднее многолетнее число дней с экстремальным обледенением судов. В течение года наиболее часто экстремальное обледенение наблюдается в январе (до пяти дней в месяц). В теплый период года, с мая по сентябрь, среднее количество дней с экстремальным брызговым обледенением составляет менее одного в месяц.

Рассмотрим полученные временные изменения повторяемости общего числа дней с обледенением за год и числа дней с экстремальным обледенением в течение года (рис. 5). Поля распределения этих двух показателей сходны.



**Рис. 5.** Временное изменение повторяемости обледенения судов в Баренцевом море за период 1979–2022 г. для общего числа дней с обледенением (а) и числа дней с экстремальным обледенением (б). Штриховкой обозначены области, в которых полученные тренды являются достоверными для 1%-го уровня значимости

**Fig. 5.** Temporal change in the frequency of vessel icing in the Barents Sea for the total number of days with icing (a) and for the number of days with extreme icing (b) in 1979–2022. Shading shows the areas in which the obtained trends are reliable at the 1% significance level

Вследствие среднегодового увеличения температуры воздуха уменьшается площадь морских льдов. Территории, ранее занятые морским льдом, представляют собой водную поверхность, являющуюся источником морских брызг, способствующих формированию брызгового обледенения. В связи с этим наблюдается увеличение повторяемости обледенения судов в акватории Баренцева моря, расположенной между Шпицбергом, Землей Франца-Иосифа и Новой Землей. В отдельных районах повторяемость обледенения может увеличиваться на три дня в год и более.

На юге Баренцева моря ниже  $75^{\circ}$  с. ш. и западнее  $50^{\circ}$  в. д. прослеживается влияние теплого Норвежского течения. В связи с наиболее интенсивным потеплением климата в Арктике в данном районе, не занятом морскими льдами, увеличивается средняя температура воздуха, что приводит к уменьшению повторяемости морского обледенения. В этом случае повторяемость обледенения изменяется приблизительно на три дня в год, только уже в сторону уменьшения случаев с нарастанием льда на поверхности судна.

Для периода с октября по апрель проанализировано 53 синоптических ситуации, во время которых диагностировались условия для экстремального обледенения. Выявлено, что наиболее часто такие условия были выявлены в январе (в 14 случаях из 53), феврале и декабре (11 и 10 случаев соответственно). В подавляющем большинстве случаев условия для экстремального обледенения создавались в тыловых частях циклонов, для которых характерны высокая скорость ветра и мощная адвекция холодного воздуха. Как высокие значения скорости ветра, так и низкие значения температуры воздуха способствуют образованию и нарастанию льда на поверхности судна в результате брызгового обледенения. Кроме того, в ряде случаев экстремальные значения отмечались в прифронтальной области. Узкой полосой обледенение прослеживалось перед теплым фронтом. Прифронтальная область характеризуется уменьшением порывистости ветра, но увеличением скорости ветра. Можно предположить, что именно с повышением скорости ветра связаны экстремальные значения обледенения судов в прифронтальной области.

### Заключение

В ходе работы исследованы пространственно-временные изменения обледенения морских судов в акватории Баренцева моря и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях современного климата.

Показано, что в данном регионе в среднем наблюдается около трех дней в году с атмосферными явлениями, во время которых могут формироваться опасные гололедно-изморозевые отложения на побережье. С 1966 по 2022 г. прослеживалась тенденция к уменьшению среднего годового числа дней с такими явлениями. В среднем статистически значимый линейный тренд составлял около  $-0,58$  дней за 10 лет. Значимый положительный тренд наблюдался только на метеорологической станции «Кандалакша», остальные положительные тренды статистически не значимы. В целом тренды имеют большой разброс, что делает неоднозначным вывод о многолетних изменениях повторяемости явлений атмосферного обледенения.

С использованием данных реанализа *ERA5* получена повторяемость метеорологических условий обледенения морских судов для периода с 1979 по 2022 г. Выявлены области с максимальной и минимальной повторяемостью среднего годового числа дней с обледенением различной интенсивности. Показано, что в некоторых районах Баренцева моря среднее число дней с экстремальным обледенением составляет более 30 дней в году. Наибольшая повторяемость морского обледенения наблюдается в восточной части Баренцева моря, в том числе – вблизи западного побережья Новой Земли.

Показано, что в течение последних десятилетий произошли значимые изменения повторяемости обледенения судов в Баренцевом море. Наблюдалось как уменьшение среднего за год числа дней с обледенением до трех дней за год (южнее  $75^\circ$  с. ш. и западнее  $50^\circ$  в. д), так и увеличение до трех дней за год (в северной и восточной части Баренцева моря).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилина И. Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. 2021. № 1 (45). С. 66–87. EDN GSPTRV. <https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.04>
2. Суханов С. И., Лавренов И. В., Яковлева Н. П. Обледенение судов на Черном море // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 75–86. EDN KUHMAF.
3. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic / D. L. Gautier [et al.] // Science. 2009. Vol. 324, iss. 5931. P. 1175–1179. <https://doi.org/10.1126/science.1169467>
4. Marine icing phenomena on vessels and offshore structures: Prediction and analysis / A. R. Dehghani-Saniij [et al.] // Ocean Engineering. 2017. Vol. 143. P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.049>
5. Mintu S., Molyneux D. Ice accretion for ships and offshore structures. Part 1 – State of the art review // Ocean Engineering. 2022. Vol. 258. 111501. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111501>
6. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н. П. Шакина [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. № 348. С. 130–161. EDN PTTLTB.
7. Zhou L., Liu R., Yi X. Research and development of anti-icing/deicing techniques for vessels: Review // Ocean Engineering. 2022. Vol. 260. 112008. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112008>
8. Петров А. Г. Синоптические условия обледенения судов на акваториях дальневосточных морей // Гидрометеорологические процессы на шельфе: Оценка воздействия на морскую среду. Владивосток : Дальнаука, 1998. С. 38–45. (Труды Дальневосточного Ордена Трудового Красного Знамени регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института).
9. Суркова Г. В., Лаврентьева А. И., Ткачева Е. С. Региональные особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России на фоне меняющегося климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70, № 1. С. 21–32. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32>
10. Naseri M., Samuelsen E. M. Unprecedented vessel-icing climatology based on spray-icing modelling and reanalysis data: A risk-based decision-making input for Arctic offshore industries // Atmosphere. 2019. Vol. 10, iss. 4. 197. <https://doi.org/10.3390/atmos10040197>
11. Samuelsen E. M., Gravervsen R. G. Weather situation during observed ship-icing events off the coast of Northern Norway and the Svalbard archipelago // Weather and Climate Extremes. 2019. Vol. 24. 100200. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100200>
12. Леонов И. И., Аржанова Н. М. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2023. Т. 9, № 1. С. 107–126. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-107-126>
13. Kendall M. Rank correlation methods. London : Griffin, 1970. 202 p.
14. Mann H. Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13, no. 3. P. 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
15. Аржанова Н. М., Коришунова Н. Н. Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в условиях современных изменений климата // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2019. № 184. С. 33–44. EDN PWJPUR.
16. Мастрюков С. И. Оценка отечественных и зарубежных методов расчета брызгового обледенения судов // Навигация и гидрография. 2011. № 31. С. 81–86. EDN OFWLRZ.
17. Prediction of vessel icing / J. E. Overland [et al.] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1986. Vol. 25, iss. 12. P. 1793–1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C1793:POVI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C1793:POVI%3E2.0.CO;2)
18. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

19. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia / P. Groisman [et al.] // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11, no. 4. 045007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045007>

*Об авторах:*

**Лаврентьева Анастасия Игоревна**, студент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), **ORCID ID: 0000-0002-2985-0063**, [lavrentevaai@my.msu.ru](mailto:lavrentevaai@my.msu.ru)

**Леонов Игорь Иванович**, главный специалист, АО «Россети Научно-технический центр» (115201, Россия, Москва, Каширское ш., д. 22, к. 3), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0009-0000-6747-8170**, **SPIN-код: 5038-0828**, [ebernlev@gmail.com](mailto:ebernlev@gmail.com)

**Соколихина Наталья Николаевна**, доцент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), кандидат географических наук, доцент, **SPIN-код: 5311-0026**, **ORCID ID: 0000-0001-9373-609X**; **WOS Research ID: L-6159-2015**; **Scopus Author ID: 6507391878**, [natalia.sokolikhina@gmail.com](mailto:natalia.sokolikhina@gmail.com)



Научная статья

УДК 551.35  
EDN: YGDVYH

## Распределение и состав углеводов в донных отложениях Камышовой бухты (Черное море)

О. В. Соловьёва<sup>1</sup>, Е. А. Тихонова<sup>1</sup>, К. И. Гуров<sup>2</sup>, ✉

<sup>1</sup> Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

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

✉ [gurovki@gmail.com](mailto:gurovki@gmail.com)

Поступила в редакцию 01.04.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024;  
принята к публикации 17.07.2024.

### Аннотация

**Цель.** Цель настоящего исследования – выявление особенностей пространственного и вертикального распределения углеводов в донных отложениях прибрежной акватории, испытывающей постоянную антропогенную нагрузку, и оценка вероятных источников их поступления в морскую среду (на примере Камышовой бухты).

**Методы и результаты.** Пробы поверхностного слоя донных отложений (девять станций) и колонка отложений были отобраны в июле 2021 г. в рамках многолетнего мониторинга севастопольских бухт, проводимого ФИЦ ИнБЮМ совместно с ФИЦ МГИ. Изучены особенности пространственного распределения углеводов, алканов и отдельных геохимических маркеров в поверхностном слое (0–5 см) и вертикальном разрезе донных отложений. Проанализирована история накопления рассматриваемых веществ в донных отложениях бухты на протяжении 30 лет. Концентрация углеводов в донных осадках колебалась от 27,6 до 98,5 мг/кг, что позволяет отнести эти осадки к слабозагрязненным. Послойное исследование углеводородного состава донных отложений бухты показало, что в течение 30 лет донные отложения не были существенно загрязнены углеводородами. По результатам анализа состава алканов и значений геохимических маркеров установлено, что преобладающий источник поступления углеводов, как и в поверхностном слое, – аллохтонное и автохтонное органическое вещество. Повышенные значения геохимических маркеров, диагностирующих нефтяное загрязнение, указывают на то, что второстепенным источником углеводов можно считать поступление нефти и нефтепродуктов.

**Выводы.** Углеводороды в донных отложениях Камышовой бухты распределены неравномерно по акватории, образуется зона повышенного загрязнения в центральной части бухты. Это может являться следствием процессов, происходящих в полузамкнутой бухте, и определяться типом донных отложений. Согласно полученным результатам исследования углеводородного состава донных отложений, за прошедшие 30 лет и до настоящего времени антропогенная нагрузка на бухту Камышовую претерпевала незначительные колебания в связи с уровнем экономической активности порта, при этом уровень загрязнения бухты остается невысоким.

**Ключевые слова:** донные отложения, углеводороды, n-алканы, маркеры, Камышовая бухта, Черное море

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственных заданий ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозоологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акватори-

© Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Гуров К. И., 2024

ями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации 124030100127-7) и темам ФГБУН ФИЦ МГИ «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях» (FNNN-2024-0001) и «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков CO<sub>2</sub> в морской среде Черного и Азовского морей» (FNNN-2022-0002).

**Для цитирования:** Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Гуров К. И. Распределение и состав углеводородов в донных отложениях Камышовой бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 669–689. EDN YGDVYH.

Original article

## Distribution and Composition of Hydrocarbons in the Bottom Sediments of Kamyshovaya Bay (Black Sea)

O. V. Soloveva<sup>1</sup>, E. A. Tikhonova<sup>1</sup>, K. I. Gurov<sup>2</sup>, ✉

<sup>1</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
✉ [gurovki@gmail.com](mailto:gurovki@gmail.com)

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the study is to identify the features of spatial and vertical distribution of hydrocarbons in bottom sediments of the coastal area under constant anthropogenic load, and to assess the likely sources of their inlet into the marine environment (using Kamyshovaya Bay as an example).

**Methods and Results.** The surface layer of bottom sediments (nine stations) and the sediment column were sampled in July 2021 as a part of long-term monitoring of the Sevastopol bays jointly performed by FRC IBSS and FRC MHI. The features of spatial distribution of hydrocarbons, alkanes and some geochemical markers in the surface layer (0–5 cm) and the vertical profile of bottom sediments are studied. The 30-year accumulation history of the considered substances in the bay bottom sediments is analyzed. The concentration of hydrocarbons in the bottom sediments ranges from 27.6 to 98.5 mg/kg that allows us to classify these sediments as low-polluted. A layer-by-layer study of the hydrocarbon composition in the bay bottom sediments shows that in course of 30 years the bottom sediments were not significantly polluted with hydrocarbons. The results of analyzing the alkane composition and the geochemical marker values make it possible to establish that, as well as in the surface layer, the predominant source of hydrocarbon inlet was allochthonous and autochthonous organic matter. The increased values of geochemical markers identifying oil pollution indicate the fact that the inlet of oil and oil products can be considered a secondary source of hydrocarbons.

**Conclusions.** Hydrocarbons in the bottom sediments are distributed unevenly over the Kamyshovaya Bay water area, namely in the central part of the bay, a zone of the increased pollution is formed. It can be a consequence of the processes taking place in the semi-enclosed bay, as well as conditioned by the type of bottom sediments. The results of studying the hydrocarbon composition of bottom sediments show that in course of the past 30 years and up to present, Kamyshovaya Bay has been under the anthropogenic load which fluctuated insignificantly due to the degree of economic activity of the port. At that the level of the bay pollution remains low.

**Keywords:** bottom sediments, hydrocarbons, n-alkanes, markers, Kamyshovaya Bay, Black Sea

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of state assignments of IBSS on theme “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemocological processes in the ecosystems of water bodies of the Sea of Azov–Black Sea basin in comparison with other areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their drainage basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (state registration no. 124030100127-7), and FSBSI FRC MHI on themes “Fundamental studies of the processes that determine fluxes of matter and energy in

the marine environment and at its boundaries, the state and evolution of the physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions” (FNNN-2024-0001) and “Monitoring of the carbonate system, CO<sub>2</sub> content and fluxes in the marine environment of the Black Sea and the Sea of Azov” (FNNN-2022-0002).

**For citation:** Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A. and Gurov, K.I., 2024. Distribution and Composition of Hydrocarbons in the Bottom Sediments of Kamyshovaya Bay (Black Sea). *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 626-646.

## Введение

В Севастопольском регионе отмечено более 30 бухт, часть которых используется для портов. Подобные портовые акватории постоянно испытывают антропогенное воздействие. Не является исключением и Камышовая бухта [1]. В качестве факторов антропогенной нагрузки на акваторию Камышовой бухты можно рассматривать использование ее в качестве порта; размещение на берегах бухты нефтеналивного предприятия «Югторсан»; наличие очистных сооружений, цементного завода и самой мощной (255 МВт) котельной в Крыму [1].

Органические вещества нефтяной природы попадают в морскую воду не только при эксплуатации морского транспорта, но и со стоками ливневых и канализационных вод, в том числе вследствие возведения объектов капитального строительства [2, 3]. При этом, согласно ранее проведенным натурным наблюдениям (июнь 2012 г.), акватория бухты была слабо загрязнена нефтью и нефтепродуктами по сравнению с другими портовыми акваториями (б. Севастопольская, б. Балаклавская). В воде отмечены концентрации нефтяных углеводородов менее предела количественного определения методом ИК-спектроскопии [1].

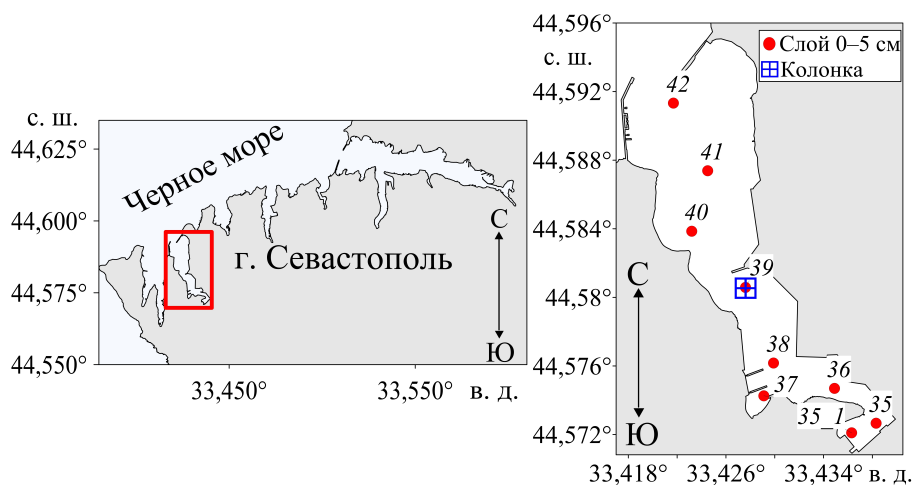
По предположению авторов [4], в Камышовой бухте происходит процесс очистки вод в результате адсорбции органических веществ мелкозернистым материалом донных отложений. По ранее полученным данным, с 2009 г. наблюдалось незначительное снижение содержания хлороформ экстрагируемых веществ в донных отложениях, а концентрация в донных отложениях нефтяных углеводородов до 2015 г. не превышала 100 мг / 100 г, что соответствует природному уровню содержания данного класса веществ [5].

Тем не менее в более поздних работах [6] представленные авторами результаты указывают на повышение содержания органического вещества и отсутствие значимых постоянных источников их поступления. Отмечено, что увеличение содержания органического вещества на фоне уменьшающейся антропогенной нагрузки объясняется влиянием естественных факторов. Сохранение подобных тенденций может привести к замене субкислородных условий в донных отложениях на анаэробные, что повлечет за собой негативные последствия для акватории бухты в целом. К естественным факторам, влияющим на перераспределение органических веществ, в том числе углеводородов, в акватории, относятся особенности бухты: ее полузамкнутость, изрезанность береговой линии, большое количество пирсов и стоянок судов, неравномерная антропогенная нагрузка, наличие заградительного мола, препятствующего водообмену между бухтой и открытым морем и т. д. В связи с вышеперечисленным возникает необходимость постоянного контроля состояния акватории бухты. Наиболее информативными и показательными во временном аспекте являются донные отложения как «депо» для загрязнителей.

Цель настоящего исследования – выявление особенностей пространственного и вертикального распределения углеводородов в донных отложениях прибрежной акватории, испытывающей постоянную антропогенную нагрузку, и оценка вероятных источников их поступления в морскую среду (на примере Камышовой бухты).

### Характеристика района исследований

Камышовая бухта расположена на севере Гераклеийского п-ова. Как и Стрелецкая бухта, она глубоко вдается в сушу (рис. 1). Протяженность бухты 2,75 км, ширина у устья – 1 км, глубина – 11–18 м; ширина в центральной части – 300–350 м, глубина – 7–12 м, ширина вершины бухты – 100–130 м, глубина – 6–7 м [7].



**Рис. 1.** Район исследований (слева) и схема станций отбора проб донных отложений в Камышовой бухте, лето 2021 г. (справа)

**Fig. 1.** Study area (left) and scheme of bottom sediment sampling stations in Kamyshevaya Bay, summer 2021(right)

В кутовой части бухты расположены рыболовецкий колхоз «Путь Ильича», ООО «Атла» (работы по ремонту, модернизации и наладке технологического оборудования по переработке рыбного и крилевого сырья на рыбодобывающих судах и предприятиях пищевой промышленности Азово-Черноморского бассейна) и Портово-перегрузочный комплекс МСГ, предназначенный для выгрузки металла с судов для последующей обработки на заводе. На восточной стороне бухты находятся рыбный порт, производство москитных сеток, завод пластиковых окон «Виктория», на западной – завод полимерных материалов «Индустрия Пенопласта», мастерские по ремонту судовых силовых установок, жилой комплекс *Porto Franco*.

Согласно работе [8], в Камышовую бухту поступают неочищенные сточные воды от двух постоянно работающих и одного аварийного выпусков сточных вод, также стоки ливневой канализации.

## Материал и методы исследования

Пробы донных отложений отбирали в летний период 2021 г. дночерпателем Петерсона с площадью захвата 0,038 м<sup>2</sup>, затем помещали в герметичные пакеты, маркировали и в холодильном оборудовании доставляли в лабораторию.

Для изучения вертикального распределения углеводов донные отложения отбирали ручным пробоотборником с трубкой из оргстекла и вакуумным затвором. В лаборатории колонку грунта разделяли на слои по 2 см, высушивали, растирали в ступе и часть пробы просеивали через сита с диаметром ячеек 0,25 мм.

Данные о гранулометрическом составе донных отложений Камышовой бухты взяты из работ [4, 6].

Определение концентраций углеводов и н-алканов проводили на базе ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Подробная методика определения углеводов и н-алканов представлена в работе [9]. Для анализа алканов из углеводородной фракции использовали газовый хроматограф «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Разделение углеводов осуществляли на капиллярной колонке *TR-1MS* длиной 30 м, диаметром 0,32 мм и толщиной неподвижной фазы (100 % диметилполисилоксан) 0,25 мкм (*Thermo Scientific*). Для абсолютной калибровки прибора в качестве смеси углеводов использовали стандартный образец *ASTM D2887 Reference Gas Oil* (фирма *Supelco*, США). Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0», метод абсолютной калибровки и процентной нормализации.

Однако с помощью газовой хроматографии возможно оценить не все поступающие в донные отложения углеводороды из-за трансформации органических веществ и формирования более сложных соединений. Одним из примеров являются циклоалканы (нафтены). Смесь такого рода органических веществ называют *Unresolved complex mixture (UCM)*, хроматографически неразделимым фоном (н/ф) или «горбом». *UCM* рассчитывали путем вычитания площадей пиков хроматографически разделенных углеводов из общей площади хроматограммы [9].

Для идентификации вероятного генезиса углеводов используют различные диагностические индексы (маркеры). Например, с целью дифференциации соединений аллохтонного и автохтонного происхождения используют соотношение терригенных и автохтонных соединений (*TAR*, *TMD*,  $C_{31}/C_{19}$ ), среднюю длину углеводородной цепи (*ACL*), соотношение низкомолекулярных и высокомолекулярных гомологов (*LWH/HWH*). Отдельные маркеры позволяют уточнить характер биогенной природы соединений, в частности оценить вклад травянистой и древесной растительности в формирование аллохтонной составляющей поступающих в донные отложения углеводов – это, например, соотношения  $C_{31}/C_{29}$ ,  $P_{aq}$ . Для дифференциации нефтяного или биогенного происхождения УВ используют такие соотношения, как индекс нечетности (*CPI*), в частности *CPI*<sub>2</sub>, рассчитанный для высокомолекулярной области, отношение величины неразделимого фона к общему содержанию н-алканов (*UCM/н-алканы*), *ACL*, *LWH/HWH* [10–15]. Для идентификации нефтяного происхождения углеводов также нередко используют коэффициент изопреноидности ( $K_i = (Pr + Ph)/(n-C_{17} + C_{18})$ ) и отношение изопреноидных алканов пристана и фитана (*Pr/Ph*) [16, 17].

В данной работе оценка вероятного происхождения углеводородов производилась на основании значения следующих маркеров: *Pr/Ph*, *Ki*, *UCM*/н-алканы, *LWH/HWH*, *P<sub>ақ</sub>*, *TAR*, *ACL*, *TMD*, *C<sub>31</sub>/C<sub>19</sub>*, *CPI<sub>2</sub>*, *C<sub>31</sub>/C<sub>29</sub>* [10–17]. Расчет данных индексов производился по следующим формулам [10–17], представленным в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Диагностические молекулярные соотношения и их типичные значения**  
**Diagnostic molecular ratios and their typical values**

Диагностический индекс (расчетная формула) [10–17] / Diagnostic index (calculation formula) [10–17]	Значение / Value	Расшифровка результата / Decoding the result
1	2	3
<i>UCM</i> /н-алканы / <i>UCM</i> /n-alkanes	> 10 < 10	Хроническое загрязнение донных отложений / Chronic pollution of bottom sediments Свежее поступление нефти / Fresh inflow of oil
$LWH/HWH = \sum(C_{11} - C_{21})/\sum(C_{22} - C_{35})$	> 1 < 1	Нефтяное происхождение / Oil origin Терригенное происхождение, высшая растительность / Terrigenous origin, higher vegetation
$CPI_2 = (1/2)\{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35})/(C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35})/(C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})\}$	~ 1 < 1 > 1	Большая доля углеводородов нефтяного происхождения / Large share of hydrocarbons of oil origin Преимущественно биогенное происхождение / Predominantly biogenic origin Биогенное влияние на состав углеводородов терригенного органического вещества / Biogenic influence on hydrocarbon composition of terrigenous organic matter
$Ki = (Pr + Ph)/(н-C_{17} + C_{18})$	$0,8 \leq Ki \leq 1,5$ $0,3 \leq Ki \leq 0,8$ $Ki \leq 0,3$	Наличие нефти средней степени деградации / Presence of medium degraded oil Наличие слабо деградированной нефти / Presence of slightly degraded oil Наличие свежей нефти / Presence of fresh oil
<i>Pr</i> / <i>Ph</i>	< 1	Наличие в донных отложениях нефти / Presence of oil in bottom sediments
$P_{ақ} = (C_{23} + C_{25})/(C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$	0,1 $0,1 < P_{ақ} < 0,4$ $0,4 < P_{ақ} < 1$	Следы терригенной деградированной растительности / Traces of terrigenous degraded vegetation Свежие макрофиты / Fresh macrophytes Водные макрофиты / Aquatic macrophytes
$TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31})/(C_{15} + C_{17} + C_{19})$	Высокий <i>TAR</i> / High <i>TAR</i>	Преобладание терригенного материала / Predominance of terrigenous material

1	2	3
$ACL = [25C_{25} + 27C_{27} + 29C_{29} + 31C_{31} + 33C_{33}] / [C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}]$	Пониженная $ACL /$ Low $ACL$	Нефтяные выбросы / Oil emissions
$TMD = (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21} + C_{23})$	< 0,5	Автохтонное происхождение / Autochthonous origin
	0,5 < $TMD$ < 1	Смешанное происхождение / Mixed origin
	> 1	Наземная растительность / Terrestrial vegetation
$C_{31}/C_{19}$	< 0,4	Автохтонное вещество / Autochthonous matter
	> 0,4	Аллохтонное вещество / Allochthonous matter
$C_{31}/C_{29}$	< 0,4	Преобладание древесной растительности / Predominance of woody vegetation
	> 0,4	Преобладание травянистой растительности / Predominance of herbaceous vegetation

Для статистической обработки данных использовался программный пакет *Statistica 12*. Кластерный анализ слоев донных отложений, отобранных в Камышовой бухте (ст. 39), проводили методом объединения на основании данных об общем содержании углеводов, величине *UCM* и особенностях состава *n*-алканов.

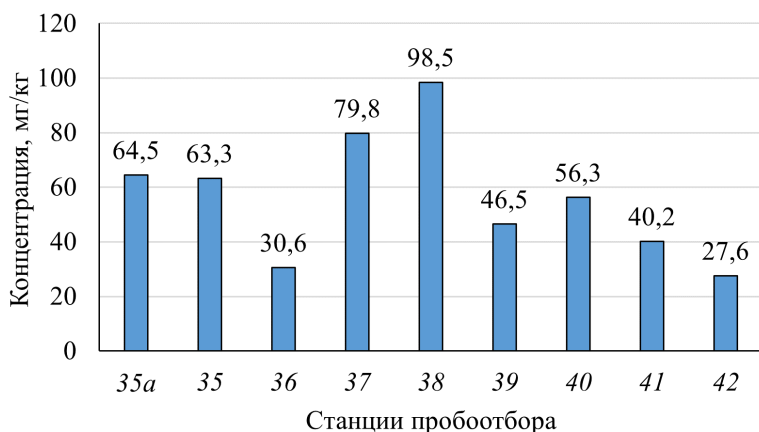
### Результаты и обсуждение

*Содержание, состав и генезис углеводов поверхностного слоя донных отложений б. Камышовой*

Гранулометрический состав отобранных донных отложений в б. Камышовой неоднороден [6]. В кутовой (ст. 35а, 35, 36) и центральной (ст. 37, 38, 39) частях они представляли собой серые илы, на ст. 40 – ракушечник с примесью песка, на выходе из бухты (ст. 41, 42) – песок с ракушей и ракушечным детритом. Отмечено, что средний размер частиц отложений (1,5 мм) на порядок выше, чем в других бухтах г. Севастополя [6].

Как результат, пространственное распределение в поверхностном слое донных отложений содержания  $S_{орг}$  также не однородно и составило 0,3–0,4 % в гравийно-песчаных отложениях в верховье бухты, 2–2,2 % в илистых отложениях в центральной и 1,2–1,8 % в кутовой части бухты [6]. Эти показатели были существенно ниже, чем в находящейся неподалеку б. Стрелецкой, где содержание  $S_{орг}$  колебалось в диапазоне от 4,28 до 6,3 % [9], а также в других бухтах г. Севастополя [6]. Отмеченные физико-химические характеристики донных отложений во многом определили их сорбционные способности в целом и особенности накопления в них углеводов в частности.

Содержание углеводов в донных отложениях Камышовой бухты различается на всех станциях отбора проб и распределено неравномерно по акватории (рис. 2). Полученные значения были максимальными в центральной части бухты (ст. 38 – 98,5 мг/кг), ниже – в кутовой части (ст. 35а – 64,5 мг/кг) и самыми низкими (ст. 42 – 27,6 мг/кг) на приближенных к выходу из бухты станциях.



**Рис. 2.** Концентрации углеводородов в донных отложениях Камышовой бухты  
**Fig. 2.** Concentrations of hydrocarbons in the bottom sediments of Kamyshevaya Bay

Для каждого из литологических типов донных отложений выявленные концентрации углеводородов были выше фоновых. На станциях с илистыми донными отложениями они составляли 50 мг/кг, превышая характерные для чистых районов значения [18]. На участках бухты с преобладанием песка и ракушки концентрации углеводородов (10 мг/кг) были также выше фоновых [19]. При этом такие уровни, скорее всего, оказывают незначительное влияние на состояние биоты. По данным работ [19, 20], показатели до 50 мг/кг не влекут за собой существенной трансформации бентосного сообщества.

Среднее содержание углеводородов по всей акватории бухты Камышовой (девять станций) составляет  $(56,4 \pm 23,2)$  мг/кг. Для сравнения в находящейся неподалеку б. Стрелецкой содержание углеводородов колебалось в диапазоне от 328 до 2175 мг/кг со средними значениями  $(1159,8 \pm 35,3)$  мг/кг [9].

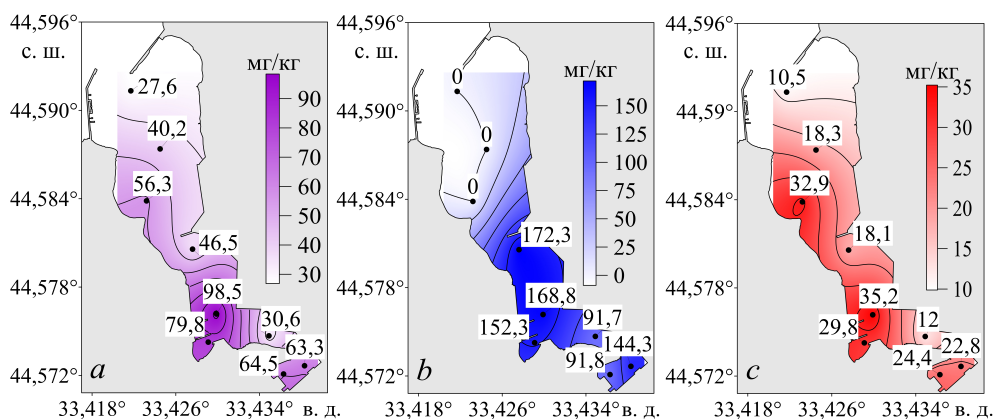
Акваторию бухты можно условно разделить на три части: кутовую (ст. 35a, 36), среднюю (ст. 37–39) и выход из нее (ст. 40–42). Средняя концентрация углеводородов в кутовой части составила 53,3 мг/кг, что соответствует среднему по бухте уровню концентрации углеводородов. В центральной части средняя концентрация углеводородов составила 74,9 мг/кг, на выходе из бухты – 41,4 мг/кг. Таким образом, илистые отложения центральной части бухты содержат максимальные концентрации углеводородов и  $S_{орг}$  (рис. 3, а).

Тот факт, что максимальные концентрации углеводородов наблюдаются в центральной части бухты, как и гранулометрический состав донных отложений, может быть следствием геоморфологических особенностей акватории, циркулирующих течений, благодаря которым вещества, поступающие в морскую среду, аккумулируются именно в данной части бухты.

Хроматографически неразделимый фон, свидетельствующий о захоронении трансформированного органического вещества, отмечен не на всех хроматограммах. Средняя концентрация неразделимой смеси на тех участках, где



она выявлена, составила  $(91,2 \pm 36,4)$  мг/кг. Максимальное значение наблюдалось на ст. 39 и составляло 172,3 мг/кг (рис. 3, *b*). На хроматограммах с трех станций на выходе из бухты (ст. 40, 41, 42) «горб» отсутствовал, что преимущественно обусловлено типом донных отложений (ракушечник и песок), не способствующим аккумуляции веществ [6]. Связь величины «горба» с гранулометрическим составом донных отложений (наличием мелкодисперсных фракций) подтверждается максимальной линейной положительной корреляционной связью (0,86) между величиной *UCM* и долей пелитовой фракции.



**Р и с. 3.** Пространственное распределение в поверхностном слое донных отложений б. Камышовый: углеводов (*a*); *UCM* (*b*); *n*-алканов (*c*)

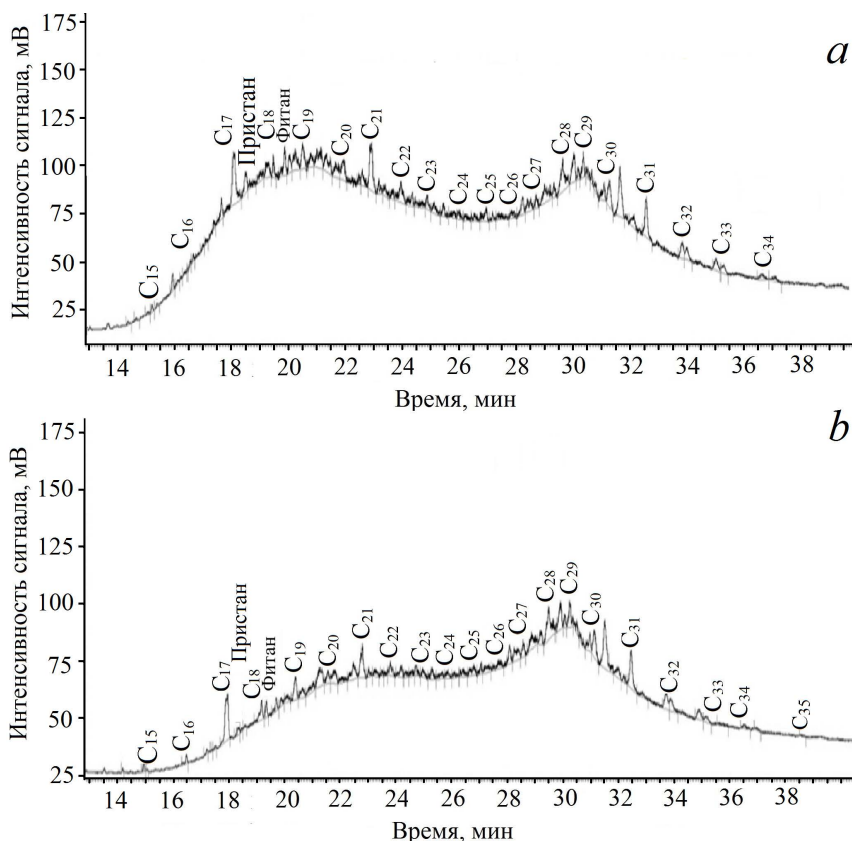
**F i g. 3.** Spatial distribution of hydrocarbons (*a*), *UCM* (*b*), and *n*-alkanes (*c*) in the bottom sediments surface layer of Kamyshevaya Bay

Неразделимый фон на хроматограммах со станций, где он был зарегистрирован, имел различные очертания. На ст. 35, 36, 37 и 38 «горб» был бимодальным с максимумами в низкомолекулярной области, что означает захоронение автохтонного материала, и в высокомолекулярной области, что обычно характерно для захоронения нефтепродуктов [21]. На ст. 35*a* и ст. 39 «горб» был выражен в высокотемпературной области, что может свидетельствовать о преимущественном депонировании компонентов нефти и нефтепродуктов (рис. 4).

Средняя концентрация *n*-алканов составила  $(22,7 \pm 8,8)$  мг/кг. Минимальный уровень (10,5 мг/кг) зафиксирован на выходе из бухты (ст. 42) (рис. 3, *c*). Пространственное распределение концентраций *n*-алканов имело такой же характер, как и распределение углеводов (рис. 3, *a*).

В донных отложениях бухты повсеместно идентифицированы *n*-алканы в диапазоне  $C_{15}$ – $C_{34}$  (рис. 5). Изопреноидные алканы, пристан и фитан зафиксированы во всех пробах. Распределения *n*-алканов на станциях в кутовой, центральной частях, а также в верховье бухты (рис. 5) имели сходный характер. К его основным чертам относилась бимодальность (рис. 4, 5), свидетельствующая о двойственности источников поступления углеводов. Зафиксировано преобладание нечетных фитопланктонных пиков в диапазоне  $C_{17}$ – $C_{21}$  [21]. Вторая группа пиков относится к соединениям в диапазоне  $C_{27}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{31}$ . Нечетные

гомологи в этом диапазоне генетически связаны с аллохтонным органическим веществом [22] и типичны для прибрежных районов [10].



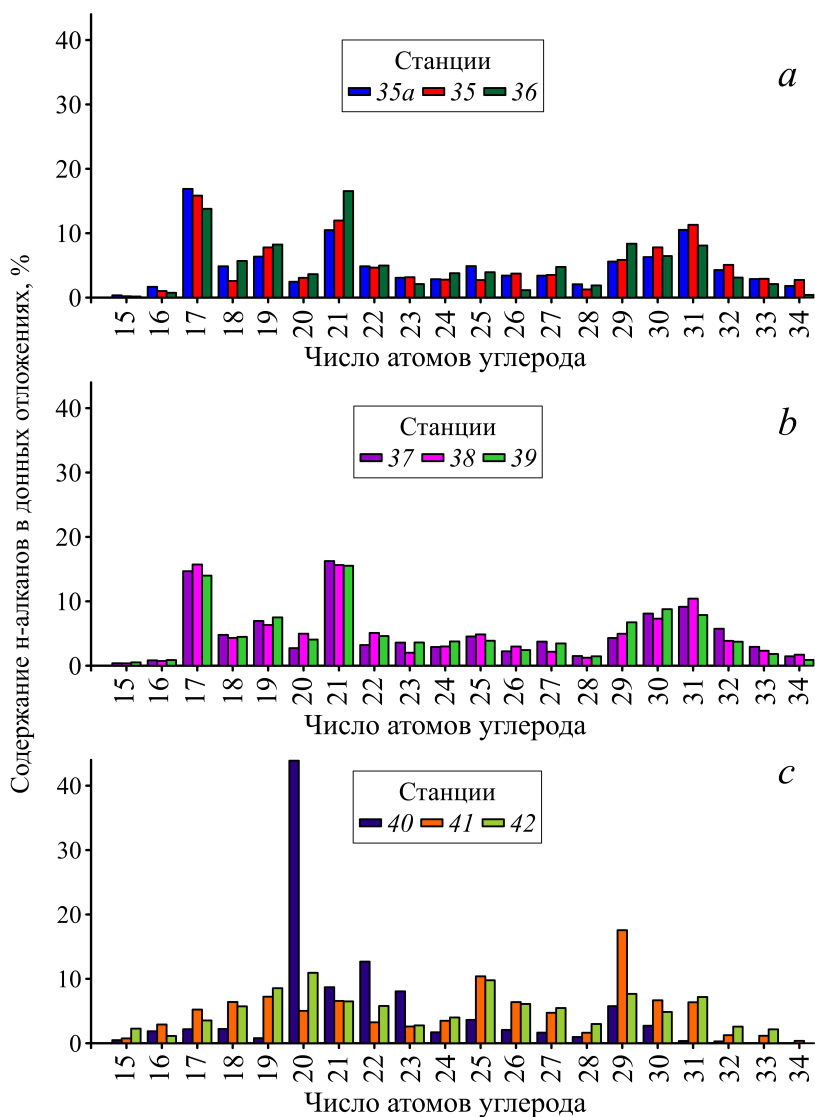
**Р и с. 4.** Характерные хроматограммы донных отложений Камышовой бухты: *a* – ст. 38 (вклад нескольких источников); *b* – ст. 35*a*

**F i g. 4.** Typical chromatograms of bottom sediments in Kamyshovaya Bay: *a* – station 38 (distribution due to a few sources); *b* – station 35*a*

На станциях, расположенных во внешней части бухты, распределение *n*-алканов имело свои особенности. В низкомолекулярной области основные пики были не фитопланктонные, а бактериальные ( $C_{20}$ ,  $C_{22}$ ) [11]. Особенно высоким содержанием данных гомологов (57 %) отличались донные отложения на ст. 40.

Таким образом, можно судить об интенсивном развитии фитопланктона во внутренней части акватории, находящем отражение в составе донных отложений, и существенно меньшей значимости данного процесса для формирования углеводородного состава донных отложений во внешней части бухты, где отмечается интенсивная бактериальная трансформация органического вещества.

Для определения генезиса углеводородов поверхностных донных отложений были рассчитаны диагностические индексы, значения которых на станциях пробоотбора приведены в табл. 2.



**Р и с. 5.** Состав n-алканов в поверхностном слое донных отложений Камышовой бухты по станциям: *a* – 35а, 35, 36; *b* – 37, 38, 39; *c* – 40, 41, 42

**F i g. 5.** Composition of n-alkanes in the surface layer of bottom sediments in Kamyshovaya Bay by stations: *a* – 35а, 35, 36; *b* – 37, 38, 39; *c* – 40, 41, 42

Значения  $CPI_2$  на станциях 35, 37, 38, 39 были близки к 1, что может быть признаком относительно свежего нефтяного загрязнения [12]. На остальных станциях 35а, 36, 40, 41, 42 значения маркера были выше 1, что может являться показателем преобладания биогенного вещества (табл. 2).

Соотношение пристана и фитана, которое является маркером наличия нефти, указывало на вероятное наличие нефтяного загрязнения ( $Pr/Ph < 1$ ) практически во всех отобранных пробах.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Значения индексов в поверхностном слое донных отложений**  
**Index values in the surface layer of bottom sediments**

Индексы / Indices	Станции / Stations								
	35a	35	36	37	38	39	40	41	42
<i>Pr/Ph</i>	0,71	0,92	0,47	0,08	0,69	0,22	0,33	0,41	0,21
<i>Ki</i>	0,24	0,37	0,30	0,19	0,30	0,22	0,80	0,52	0,71
<i>UCM/н-алканы</i> / <i>UCM/n-alkane</i>	3,77	6,32	7,62	5,11	4,79	9,52	0,00	0,00	0,00
<i>LWH/HWH</i>	0,91	0,89	1,16	0,99	1,13	1,06	2,68	0,60	0,80
<i>P<sub>aq</sub></i>	0,33	0,26	0,27	0,38	0,31	0,34	0,66	0,35	0,46
<i>TAR</i>	0,83	0,87	0,96	0,78	0,78	0,82	2,25	2,17	1,42
<i>ACL</i>	29,35	29,52	29,09	29,18	29,43	29,36	27,5	28,16	28,35
<i>TMD</i>	0,73	0,67	0,67	0,59	0,62	0,58	0,56	1,80	1,36
<i>C<sub>31</sub>/C<sub>19</sub></i>	1,66	1,45	0,98	1,32	1,65	1,05	0,44	0,88	0,84
<i>CPI<sub>2</sub></i>	1,49	1,20	1,86	1,21	1,34	1,25	1,68	2,25	1,76
<i>C<sub>31</sub>/C<sub>29</sub></i>	1,88	1,93	0,97	2,13	2,10	1,17	0,06	0,36	0,94

Коэффициент изопреноидности, позволяющий оценить степень биодegradации нефти [17], колебался в диапазоне, характерном для свежего и слабо деградированного нефтяного загрязнения. Самые высокие, характерные для слабо деградированной нефти значения данного индекса (0,52–0,8) были на ст. 40–42 (табл. 2).

Соотношение *UCM/н-алканы* не превышало 9,52, что указывает на современное поступление нефтепродуктов [23]. Анализ данного маркера соответствует результатам, полученным на основании коэффициента изопреноидности.

На основании исследования маркеров нефтяного загрязнения можно предполагать современное поступление нефти и нефтепродуктов в донные отложения, а также их биотрансформацию в донных отложениях.

Индекс *LWH/HWH* на всех станциях, кроме ст. 40 (в центральной части бухты), демонстрирует относительно равное соотношение легких и тяжелых гомологов, свидетельствующее об одинаковом вкладе автохтонных и аллохтонных источников углеводородов [24], что характерно для прибрежных акваторий.

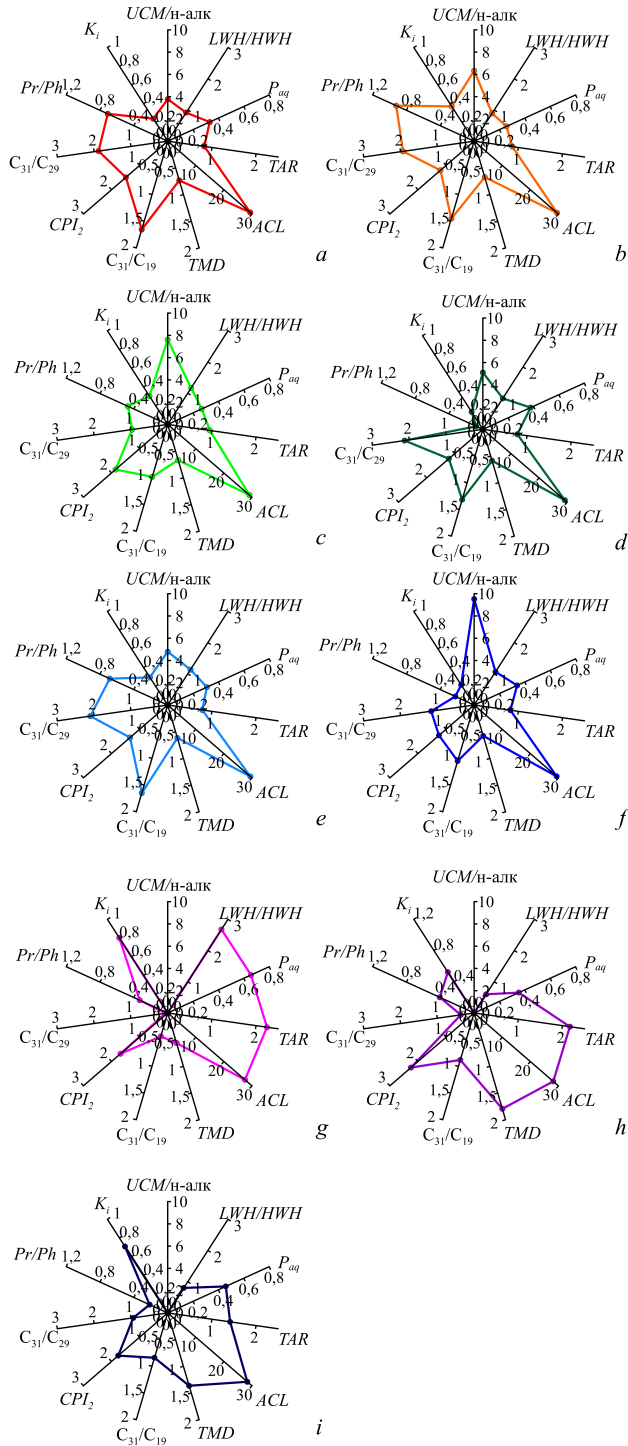
Индекс  $P_{aq}$  на всех станциях, кроме ст. 40 и 42, изменялся от 0,26 до 0,38, что свидетельствует о преимущественно терригенном происхождении органического вещества в донных отложениях бухты [25]. На ст. 40 и 42 вероятен существенный вклад водной растительности.

Индекс  $TAR$  на ст. 35а–39 меньше единицы, что отображает поступление автохтонного материала в донные отложения, на остальных станциях доминирует поступление терригенного материала. Рассчитанный индекс  $ACL$  показывает смешанный вклад травянистой и древесной растительности. Индекс  $TMD$  на ст. 35а–40 варьировал от 0,56 до 0,73, что соответствует смешанному вкладу наземных и морских источников. На ст. 41 и 42 доминирует вклад наземной растительности, что соответствует пониженному содержанию нечетных фитопланктонных  $n$ -алканов в донных отложениях этих станций. Высокие значения (0,84–1,66) соотношения  $C_{31}/C_{19}$  на всех станциях, за исключением ст. 40, отражают преобладающий вклад наземной растительности.

Соотношение  $C_{31}/C_{29}$  на станциях ст. 35а–39, 42 означает наибольший вклад травянистой растительности, в то время как на ст. 40, 41 превалирует доля древесной растительности.

Распределение основных маркеров на станциях отбора проб представлено на рис. 6. На ст. 35а, 35 и 36 индексы близки по значению, что может свидетельствовать о единообразных условиях накопления и трансформации углеводородов в донных отложениях указанных станций. Показатели на ст. 37, 38, 39 также сходны на графике. Показатели на ст. 40 отличаются от показателей с остальных станций, что связано, скорее всего, с составом донных отложений (станция пробоотбора расположена на известковом склоне бухты). Станции 41 и 42 имеют свои особенности распределения маркеров в связи с удаленностью от вершины бухты и более интенсивным водообменом на данном участке.

По результатам выполненных исследований, концентрация углеводородов в донных отложениях бухты колебалась в пределах 27,6–98,5 мг/кг. С учетом типов донных отложений (илы, пески, ракушняки), у которых уровень загрязнения различен, данные показатели в целом соответствуют показателям для относительно благополучных, но испытывающих антропогенную нагрузку акваторий. На основании анализа хроматограмм алканов, имеющих преобладающие пики, соответствующие природным источникам углеводородов, и отдельных геохимических маркеров, значения которых соответствуют преобладанию биогенного органического вещества, можно предположить, что основными их источниками в донных отложениях являются природные процессы. При этом зафиксированы признаки (значения  $CPI_2$  на отдельных станциях близки к 1,  $Pr/Ph < 1$ , повышенные значения  $Ki$ ,  $UCM/n$ -алканы  $< 10$ ) современного поступления нефти и нефтепродуктов.



**Р и с. 6.** Соотношение основных маркеров в донных отложениях Камышевой бухты по станциям: *a* – 35*a*; *b* – 35; *c* – 36; *d* – 37; *e* – 38; *f* – 39; *g* – 40; *h* – 41; *i* – 42

**F i g. 6.** Ratio of the main markers in bottom sediments of Kamyshevaya Bay by station: *a* – 35*a*; *b* – 35; *c* – 36; *d* – 37; *e* – 38; *f* – 39; *g* – 40; *h* – 41; *i* – 42

Многолетнее изменение содержания, состава и генезиса углеводородов в донных отложениях б. Камышовой

Для анализа особенностей накопления донными отложениями углеводородов и временной изменчивости их поступления в акваторию бухты была отобрана колонка донных отложений, которая разрезалась на слои по 2 см. Исследования были проведены на одной из станций (ст. 39) в центральной части бухты. Высота отобранной колонки составила 14 см.

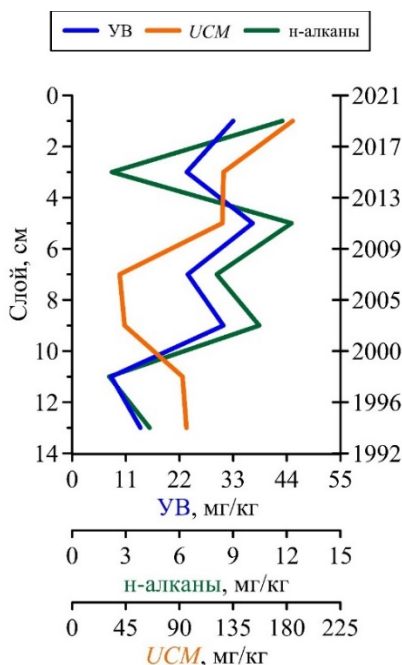


Рис. 7. Распределение УВ, UCM, n-алканов в колонке донных отложений бухты Камышовой (ст. 39)

Fig. 7. Distribution of hydrocarbons, UCM and n-alkanes in the bottom sediments column of Kamyshevaya Bay (station 39)

Изменение содержания углеводородов, n-алканов и UCM с глубиной происходило неодинаково: в слое 4–6 см наблюдается максимальная концентрация углеводородов (37 мг/кг), при этом наибольшие значения UCM были в слое 0–6 см (125–185 мг/кг). Это может быть следствием изменения интенсивности и характера загрязнения, признаком которого является накопление в донных отложениях неразделимой смеси.

Донные отложения в вертикальном разрезе бухты являются слабозагрязненными и соответствуют первому уровню загрязнения [20]. Учитывая илистый характер донных отложений, их можно считать условно чистыми (до 50 мг/кг). В литературе также указано, что при исследованиях донных отложений б. Камышовой в XX в. фиксировались слегка повышенные уровни нефтяных углеводородов, что характеризует акваторию как слабозагрязненную [13].

Отмечено достаточно равномерное распределение исследуемых веществ по горизонтам в диапазоне глубин от 0 до 10 см, где содержание углеводородов колебалось в пределах 24,5 до 33,0 мг/кг (рис. 7). В более глубоких слоях (10–12 и 12–14 см) отмечено понижение концентрации углеводородов до 8,0–14,0 мг/кг. Содержание n-алканов в слоях колонки колебалось в пределах 2,5–11,4 мг/кг. Доля n-алканов от углеводородов была относительно стабильной, ее средняя величина составляла 31 % при колебаниях от 29 до 36 %.

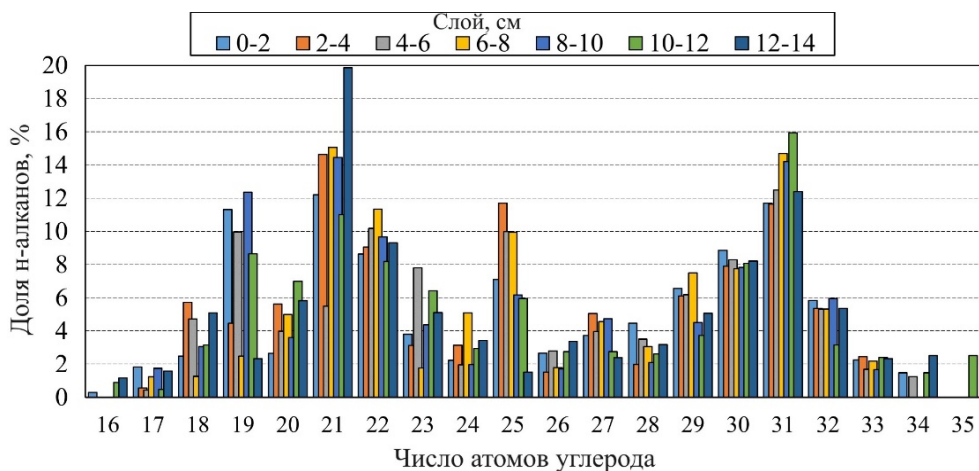
Во всех исследуемых слоях обнаружен хроматографически неразделимый фон. Зафиксировано плавное понижение «горба» от слоя 0–2 см (185 мг/кг) к слою 6–8 см (39,9 мг/кг), затем отмечено повышение концентрации UCM к слою 12–14 см – 95,9 мг/кг.

Для сравнения: в колонке донных отложений, отобранной в Стрелецкой бухте (побережье г. Севастополя), концентрации углеводов были на два порядка выше (1488–4558 мг/кг) [9].

Согласно результатам работы [4], скорость осадконакопления в бухте, полученная по данным о вертикальном распределении  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ , составила 0,47 см/год. При данной скорости отобранный слой в 14 см соответствует 30 годам, каждый слой глубиной 2 см – приблизительно 4,25 годам, что позволяет оценить историю накопления углеводов.

Максимальная концентрация углеводов в донных отложениях (с учетом скорости осадконакопления) наблюдалась в 2017–2021 гг. (слой 0–2 см) и в 2009–2013 гг. (слой 4–6 см). В 2013–2017 гг. (слой 2–4 см) концентрация углеводов была ниже по сравнению с 2017–2021 и 2009–2013 гг. Минимальные концентрации углеводов в периоды 1992–2000 гг. могут быть связаны с экономическим спадом в г. Севастополе и, как следствие, снижением товарооборота в порту: в 1993 г. он упал до 349 тыс. тонн в год. Подобная тенденция была выявлена и в акватории б. Стрелецкой [9], что свидетельствует о пониженной антропогенной нагрузке на побережье в указанный период.

Повышение концентрации углеводов в период после 2000 г. может быть связано с увеличением нагрузки на акваторию в связи с созданием новых жилых комплексов и эксплуатацией территории бухты как нефтяного и рыбного порта. При этом, если учитывать невысокие уровни углеводов, отмеченные колебания могут носить во многом естественный характер.



**Рис. 8.** Содержание n-алканов в колонке донных отложений Камышовой бухты (ст. 39)  
**Fig. 8.** Content of n-alkanes in the bottom sediments column of Kamyshovaya Bay (station 39)

В вертикальном разрезе были идентифицированы n-алканы в диапазоне  $\text{C}_{16}$ – $\text{C}_{34}$  (рис. 8), соединения  $\text{C}_{17}$ – $\text{C}_{33}$  присутствовали во всех исследованных слоях. Изопреноидные алканы, пристан и фитан, были обнаружены в 100 % проб. Распределение n-алканов во всех исследованных горизонтах было бимо-



дальным. При преобладании автохтонных  $C_{19}$  (2–11 %) и  $C_{21}$  (5–20 %) подчиненную роль имел  $C_{17}$  (до 2 %), который, вероятно, является более биодоступным и подвергся трансформации. В значимых количествах также присутствовал бактериальный пик  $C_{22}$  (8–11 %). Наиболее выраженный аллохтонный пик приходился на  $C_{31}$  (12–16 %), что связывает углеводороды в донных отложениях с травянистой растительностью, соответствующей степному побережью данного района.

Для определения генезиса углеводородов в донных отложениях были рассчитаны диагностические индексы (табл. 3).

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Значения маркеров генезиса n-алканов в вертикальном профиле донных отложений Камышовой бухты (ст. 39)**  
**Values of n-alkane genesis markers in the vertical profile of bottom sediments in Kamyshovaya Bay (station 39)**

Маркеры / Markers	Слой, см / Layer, cm						
	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14
<i>Pr/Ph</i>	1,40	0,16	0,28	0,25	1,01	2,37	1,19
<i>Ki</i>	1,50	0,70	1,20	1,30	1,60	1,60	1,20
<i>CPI<sub>2</sub></i>	1,29	2,03	1,55	1,93	1,69	1,71	0,98
<i>UCM/n-алканы / UCM/n-alkane</i>	18,03	15,04	11,02	5,49	4,54	37,22	23,54
<i>LWH/HWH</i>	0,80	0,83	0,66	0,74	1,09	0,88	1,06
<i>P<sub>ақ</sub></i>	0,37	0,45	0,49	0,35	0,36	0,39	0,28
<i>TAR</i>	1,67	4,54	2,17	7,21	1,66	2,46	5,07
<i>ACL</i>	30,00	29,90	30,0	30,0	30,00	30,90	30,30
<i>TMD</i>	1,10	1,60	1,40	1,90	1,00	1,30	0,80
$C_{31}/C_{19}$	1,00	2,60	1,30	5,90	1,20	1,80	5,30
$C_{31}/C_{29}$	1,30	1,90	2,00	2,00	3,20	4,30	2,40

В толще донных отложений, за исключением слоев 2–4, 4–6, 6–8 см, отмечено преобладание пристана (преимущественно биогенного) над фитаном. В других слоях данное соотношение диагностирует наличие нефтяного загрязнения. Коэффициент изопреноидности *Ki* в слое 2–4 см соответствовал наличию слабо деградированных нефтепродуктов, в остальных слоях его значения указывали на присутствие нефти и нефтепродуктов средней степени деграда-

ции [17]. Таким образом, состав изопреноидных *n*-алканов вертикального разреза донных отложений бухты соответствует периодическому поступлению и дальнейшей деградации нефтяных углеводородов.

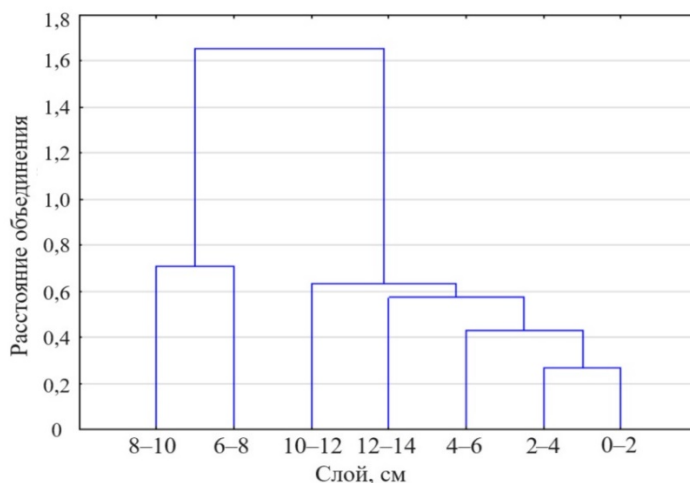
Значения величины  $CPI_2$ , которые в высокомолекулярной области изменялись в интервале 0,98–2,03 (в среднем 1,60), могут указывать как на трансформированное нефтяное загрязнение, так и на биогенную природу ОВ [14, 26, 27].

Соотношение  $UCM/n$ -алканы изменялось в пределах от 4,54 до 37,22. Минимальные соотношения отмечены в слоях 6–8 и 8–10 см в период с 2001 по 2009 г. Максимальное значение этого соотношения (37,22) наблюдалось в слое 10–12 см, что соответствовало периоду 1996–2000 гг. Значения индекса  $LWH/HWH$  составили 0,66–1,09 при среднем 0,87, что указывает на поступление терригенного вещества [24].

Индекс  $P_{aq}$  варьировал от 0,28 до 0,49, что соответствует преимущественному накоплению аллохтонных соединений. Полученные значения индекса  $TAR$  изменялись от 1,66 до 7,21, что также свидетельствует о накоплении в донных отложениях аллохтонного вещества [25].

Средняя длина углеводородной цепи ( $ACL$ ) изменялась в небольшом диапазоне 29,90–30,90, что характеризует стабильность процессов накопления и трансформации органического вещества в водоеме.

Индекс  $TMD$  со значениями 1,00–1,90 и отношение *n*-алканов  $C_{31}/C_{19}$  указывают на преимущественное захоронение в донных отложениях высокомолекулярных углеводородов.



**Р и с. 9.** Результаты кластерного анализа слоев донных отложений, отобранных в Камышовой бухте (ст. 39)

**F i g. 9.** Results of cluster analysis of the bottom sediments layers sampled in Kamyshovaya Bay (station 39)

С целью выявления периодов с различными характеристиками углеводородного фона донных отложений Камышовой бухты была проведена кластеризация горизонтов донных отложений (рис. 9) в соответствии с общим содержанием углеводородов, величиной  $UCM$ , концентрацией *n*-алканов.

За исследованный 30-летний период выделялись слои, соответствующие периоду 2000–2009 гг. (6–8 и 8–10 см), когда соотношение  $UCM/n$ -алканы было пониженным. Можно предполагать, что в этот период было изменение условий поступления и накопления углеводородов. При этом во все периоды исследований качество донных отложений характеризовало состояние бухты как благополучное.

Можно подытожить, что содержание углеводородов в различных по глубине залегания слоях донных отложений незначительно колебалось и находилось в пределах 8,0–37,0 мг/кг, что соответствует показателям для чистых акваторий. При этом выявлен хроматографически неразделимый фон, свидетельствующий о захоронении трансформированных органических соединений. На основании анализа хроматограмм алканов и отдельных геохимических маркеров преобладающим источником углеводородов в донных отложениях в течение последних 30 лет являлся природный поток органического вещества. При этом присутствуют следы трансформированной нефти.

### Заключение

Камышовая бухта, несмотря на небольшой размер, имеет четкое районирование, которое, как показано в литературе, связано с различными условиями накопления органических веществ в донных отложениях. Вследствие этого углеводороды в донных осадках Камышовой бухты распределены неравномерно по акватории, образуется зона повышенного загрязнения в центральной части бухты. Зафиксированное распределение содержания углеводородов в донных отложениях бухты является следствием процессов, происходящих в полузамкнутой бухте, а также определяется неоднородностью гранулометрического состава донных отложений, в разной мере способствующего аккумуляции веществ различной природы. Концентрация углеводородов в донных отложениях колебалась от 27,6 до 98,5 мг/кг, что позволяет отнести их к слабозагрязненным. Судя по характеру хроматограмм, имеющих преобладающие пики, соответствующие природным источникам углеводородов, и отдельным геохимическим маркерам ( $LWH/HWH$ ,  $P_{aq}$ ,  $TAR$ ,  $ACL$ ,  $TMD$ ,  $C_{31}/C_{19}$ ,  $C_{31}/C_{29}$ ), значения которых соответствуют преобладанию биогенного органического вещества, основным источником углеводородов в донных отложениях является поступление автохтонных и аллохтонных соединений. При этом зафиксированы маркеры (значения  $CPI_2$  на отдельных станциях близки к 1,  $Pr/Ph < 1$ , повышенные значения  $Ki$ ,  $UCM/n$ -алканы  $< 10$ ) современного поступления нефти и нефтепродуктов.

Послойное исследование углеводородного состава донных отложений бухты показало, что в течение последних 30 лет они не были существенно загрязнены углеводородами. Преобладающим источником поступления углеводородов, по результатам анализа состава алканов и значений геохимических маркеров, так же как в поверхностном слое, являлось аллохтонное и автохтонное органическое вещество. Судя по значениям геохимических маркеров, диагностирующих нефтяное загрязнение, второстепенным источником углеводородов можно считать поступление нефти и нефтепродуктов.

Таким образом, как в прошедшие 30 лет, так и в настоящее время бухта Камышовая испытывает антропогенную нагрузку, которая претерпевала незначительные колебания в связи с уровнем экономической активности порта, при этом уровень загрязнения бухты остается невысоким.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мезенцева И. В., Мальченко Ю. А. Комплексный подход в организации мониторинга загрязнения морских вод в прибрежных акваториях Севастополя // Труды ГОИН. 2015. Вып. 216. С. 326–339. EDN YPDEPN.
2. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2008. Т. 46. С. 110–117. EDN VSMAKD.
3. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / отв. ред. О. Г. Миронов, С. В. Алёмов. Симферополь : ИП «АРИАЛ», 2018. 270 с.
4. Кременчуцкий Д. А., Гурова Ю. С. Факторы формирования пространственного распределения природных и техногенных радионуклидов в донных отложениях Камышовой бухты, Севастополь // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 692–707. EDN FYRBGS.
5. Соловьёва О. В., Тихонова Е. А. Динамика содержания органического вещества в донных отложениях портовых акваторий Севастополя // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2018. Т. 4 (70), № 4. С. 196–206. EDN YTABLV.
6. Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона / Ю. С. Куринная [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 42–54. EDN ELPINK. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-42-54>
7. Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане. Керчь : ЮГНИРО, 2008. 195 с.
8. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсянный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2001. Вып. 2. С. 138–152. EDN KQOLRV.
9. Тихонова Е. А., Гуров К. И., Соловьёва О. В. Особенности распределения углеводов в донных отложениях Стрелецкой бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 671–691. EDN WOSDOE.
10. Осадочная Т. С. Нефтяные углеводороды в донных осадках прибрежных акваторий г. Севастополя (Чёрное море) // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 43, № 3. С. 30–36. EDN RFONDX.
11. Venkatesan M. I., Kaplan I. R. Distribution and transport of hydrocarbons in surface sediments of the Alaskan Outer Continental Shelf // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1982. Vol. 46, iss. 11. P. 2135–2149. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90190-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90190-9)
12. Глязнецова Ю. С., Немировская И. А. Особенности распределения битумоидов в донных осадках Баренцева моря // Океанология. 2020. Т. 60, № 6. С. 945–953. EDN ONYTWK. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050068>
13. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
14. Каширцев В. А. Органическая геохимия нефтидов востока Сибирской платформы. Якутск : Изд-во СО РАН, 2003. 158 с.
15. Origin of hydrocarbons in the water of the river–sea mixing zone: A case study from the Chernaya River – The Sevastopol Bay, Black Sea / O. V. Soloveva [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2021. Vol. 45. 101870. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101870>

16. *Peters K. E., Moldowan J. M.* The Biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey : Prentice Hall, 1993. 363 p.
17. *Peters K. E., Walters C. C., Moldowan J. M.* The Biomarker guide. Cambridge : Cambridge University Press, 2004. Vol. 1 : Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History. 1115 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524868>
18. *Bouloubassi I., Saliot A.* Investigation of anthropogenic and natural organic inputs in estuarine sediments using hydrocarbon markers (NAH, LAB, PAH) // *Oceanologica Acta*. 1993. Vol. 16, iss. 2. P. 145–161.
19. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments / I. Tolosa [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2004. № 48, iss. 1–2. P. 44–60. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00255-8)
20. *Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н.* О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // *Гидробиологический журнал*. 1986. Т. 22, № 6. С. 76–78.
21. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М. : Научный мир, 2013. 432 с.
22. *Cranwell P. A.* Chain-length distribution of *n*-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change // *Freshwater Biology*. 1973. Vol 3, iss. 3. P. 259–265. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1973.tb00921.x>
23. Composition and distribution of aliphatic hydrocarbon compounds and biomarkers in seafloor sediments from offshore of the Leizhou Peninsula (South China) / Y. Gao [et al.] // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, iss. 50. P. 34286–34293. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03529>
24. Sources and distribution of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China / X.-C. Wang [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2006. Vol. 52, iss. 2. P. 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.08.010>
25. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes / K. J. Ficken [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, iss. 7–8. P. 745–749. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00081-4)
26. *Немировская И. А.* Углеводороды в водах и донных осадках Баренцева моря в период изменчивости ледового покрова // *Геохимия*. 2020. Т. 65, № 7. С. 679–692. <https://doi.org/10.31857/S0016752520070079>
27. Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada / M. B. Yunker [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2015. Vol. 89–90. P. 80–116. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.10.002>

*Об авторах:*

**Соловьёва Ольга Викторовна**, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 3114-7955, ORCID ID: 0000-0002-1283-4593, Scopus Author ID: 57416802600, ResearcherID: X-4793-2019, kozl\_ya\_oly@mail.ru**

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

**Гуров Константин Игоревич**, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5962-7697, ORCID ID: 0000-0003-3460-9650, ResearcherID: L-7895-2017, gurovki@gmail.com**

Научная статья

УДК 551.466.6(265.54)  
EDN: ENUJFN

## Возбуждение внутренних волн в неглубоком морском бассейне с открытым входом в условиях параметрического резонанса

**В. В. Новотрясов**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток, Россия  
✉ vadimnov@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 05.07.2024;  
принята к публикации 13.07.2024.

### *Аннотация*

*Цель.* С использованием данных натуральных измерений показать, что в заливе Посъета под воздействием сейшевых колебаний его уровня в осенний период в условиях параметрического резонанса возбуждаются внутренние волны (ВВ).

*Методы и результаты.* Методами спектрального анализ установлен ряд частот ВВ, близких к частотам самых интенсивных сейшевых колебаний залива. Для горизонтальной компоненты орбитальной скорости ВВ получено уравнение Матье и выполнен его анализ. Для условий наблюдения ВВ сформулированы необходимые и достаточные условия реализации параметрического резонанса в модельном бассейне, аппроксимирующем залив Посъета. Проверка этих условий показала, что в заливе в осенний период выполнены как необходимые, так и достаточные условия параметрического резонанса между ВВ и сейшевыми колебаниями уровня.

*Выводы.* Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в осенний сезон в заливе Посъета ряд частот ВВ близок к частотам свободных колебаний уровня залива. Показано, что баротропные течения, индуцированные сейшевыми колебаниями, могут возбуждать внутренние волны посредством параметрического резонанса.

**Ключевые слова:** сейши, баротропное волновое течение, залив Посъета, внутренние волны, параметрическая неустойчивость, параметрический резонанс

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (тема № 1240-2210-0072-5).

**Для цитирования:** *Новотрясов В. В.* Возбуждение внутренних волн в неглубоком морском бассейне с открытым входом в условиях параметрического резонанса // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 690–705. EDN ENUJFN.

## Excitation of Internal Waves in a Shallow Sea Basin with an Open Inlet under Conditions of Parametric Resonance

V. V. Novotryasov

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Vladivostok, Russia  
✉ vadimnov@poi.dvo.ru

### Abstract

*Purpose.* The purpose of the study is to show (using the *in situ* measurement data) that in autumn under parametric resonance conditions, internal waves (IW) are excited in Posyet Bay under the influence of seiche vibrations of its level.

*Methods and Results.* The spectral analysis methods have revealed a number of IW frequencies close to those of the most intensive seiche vibrations of the bay. The Mathieu equation was obtained and analyzed for the horizontal component of IW orbital velocity. For the conditions for observing IW, the necessary and sufficient conditions for implementing the parametric resonance in the model basin approximating Posyet Bay, were formulated. Verification of these conditions has shown that in autumn both necessary and sufficient conditions of the parametric resonance between the IW and sea level seiche vibrations are fulfilled in the bay.

*Conclusions.* The experimental data indicate that in the autumn season a number of IW frequencies are close to those of free oscillations of the sea level in Posyet Bay. It is shown that the barotropic currents induced by seiche vibrations can excite internal waves by means of parametric resonance.

**Keywords:** seiches, barotropic wave current, Posyet Bay, internal waves, parametric instability, parametric resonance

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of state assignment of POI FEB RAS (theme No. 1240-2210-0072-5).

**For citation:** Novotryasov, V.V., 2024. Excitation of Internal Waves in a Shallow Sea Basin with an Open Inlet under Conditions of Parametric Resonance. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 647-661.

### Введение

Внутренние волны (ВВ) играют значительную роль в процессах перемешивания в приповерхностном и придонном погранслоях, участвуя в их формировании [1, 2]. Наряду с зимней конвекцией, этим волнам принадлежит существенная роль в процессах тепло- и массопереноса в приповерхностном слое в бассейнах, покрытых льдом [3].

Как известно<sup>1</sup> [4], возбуждение ВВ с частотами  $\sim 0,7 N_{\max}$ , где  $N_{\max}$  – максимальное значение частоты плавучести в бассейне, происходит за счет пульсаций давления или тангенциального напряжения ветра. В настоящей работе рассматривается альтернативный механизм возбуждения таких волн. Его основу представляет явление параметрической неустойчивости ВВ, вызванное таким внешним воздействием, как, напр., сейшевые колебания свободной поверхности бассейна. Особенно эффективно этот механизм проявляет себя в условиях параметрического резонанса – особого типа параметрически возбуждаемых колебаний.

---

<sup>1</sup> Миропольский Ю. З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. 302 с.

Только в последние десятилетия начаты исследования параметрической неустойчивости ВВ в стратифицированной жидкости [5]. В указанной работе приведен ряд соображений о возможности роста высокочастотных возмущений на фоне низкочастотной внутренней волны. Теоретическое исследование параметрической неустойчивости слабо нелинейной внутренней волны содержится в [6]. Здесь показано, что внутренняя волна конечной амплитуды может быть неустойчивой. В работах [7, 8] с использованием натуральных данных установлено, что в результате укрупнения переднего фронта полусуточной внутренней волны в прибрежной зоне залива Посьета идет эффективная генерация ее гармоник с периодами  $T_n = 12,4/n$  (ч),  $n = 2, 3, 4, \dots$ .

В настоящей работе для случая длинных внутренних и поверхностных волн в морском бассейне с полуоткрытой границей аналитически получены необходимые и достаточные условия возбуждения ВВ посредством параметрического резонанса. Показано, что физическая природа этого механизма возбуждения состоит в параметрической раскачке амплитуды ВВ за счет модуляции горизонтальной компоненты ее орбитальной скорости, вызванной баротропным течением, индуцированным сейшевыми колебаниями. Такой способ генерации волн в устойчиво стратифицированной жидкости существенно отличается от широко известных способов [9, 10] и осуществляется без внесения дополнительной анизотропии в систему, что обеспечивает, в частности, отсутствие пространственного рассеяния энергии, переносимой ВВ. С использованием натуральных данных анализируется возможность осуществления необходимых и достаточных условий параметрического резонанса между полем внутренних волн и баротропным волновым потоком, создаваемым модой Гельмгольца и последующими модами сейшевых колебаний в заливе Посьета.

Целью данной работы является изучение процесса параметрической генерации внутренних волн в неглубоком морском бассейне сейшевыми колебаниями его уровня на основе теоретических представлений о параметрическом резонансе в гидродинамических системах и натуральных наблюдений, выполненных в разные годы в заливе Посьета.

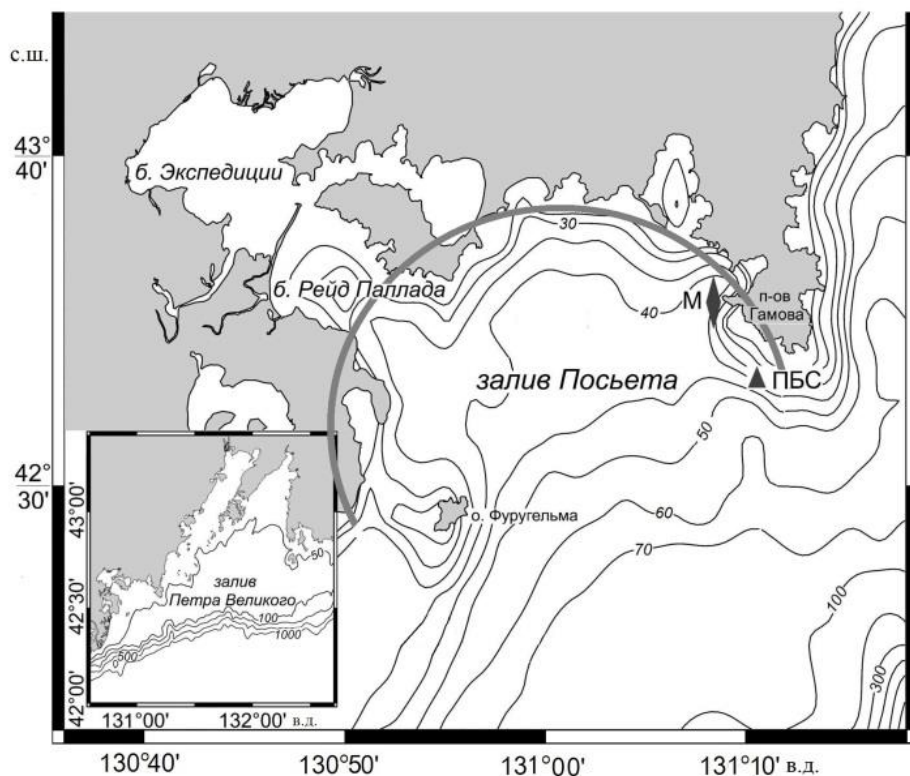
### **Район исследования и данные измерений**

Анализ частотного состава сейшевых колебаний проводился с использованием данных, полученных мареографом. Погрешность его измерений составила 0,5 см, интервал дискретизации в октябре 2001 г. – 7,5 мин, в августе 2003 г. – 1 мин. Мареограф был установлен в береговой зоне залива Посьета в районе п-ова Гамов. На карте-схеме залива (рис. 1) его положение обозначено ромбовидным символом. Здесь же на карте показана батиметрия залива, полученная из навигационных карт залива и примыкающих к нему бухт<sup>2</sup>. Полукругом с радиусом  $L \sim 13,5$  км ограничена акватория, аппроксимирующая залив. Согласно навигационной карте, глубина залива на входе составляет  $\sim 45\text{--}50$  м.

---

<sup>2</sup> Атлас залива Петра Великого и северо-западного берега Японского моря до бухты Соколовская (для маломерных судов). Владивосток : ООО «ГИРОСКОП», 2009. 10 с.



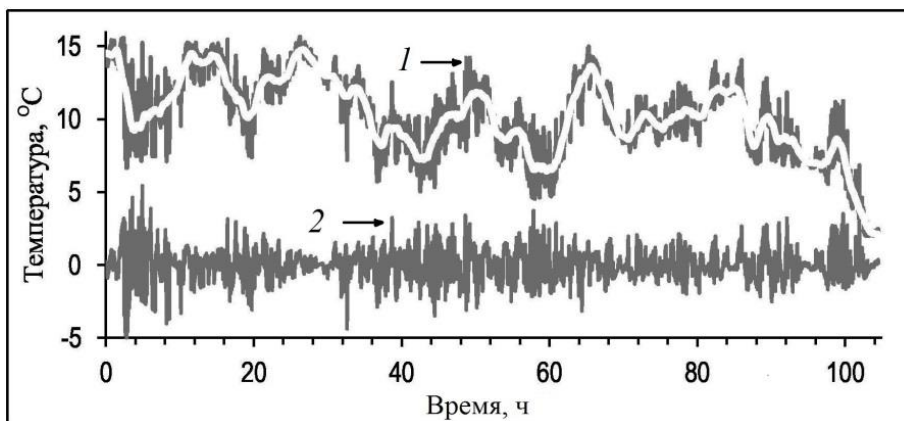


**Р и с. 1.** Карта-схема залива Посыета. На врезке показан залив Петра Великого  
**F i g. 1.** Map-diagram of Posyet Bay. The inset shows Peter the Great Bay

Исследование внутренних волн выполнено по данным измерений вертикального разреза поля температуры с использованием притопленной буйковой станции (ПБС), выставленной 14 сентября 2013 г. на изобате 40 м. Географическое местоположение ПБС показано на рис. 1 черным треугольником. Она была оснащена девятью измерителями температуры НОВО на расстоянии 4 м друг от друга начиная от поверхности. Автономный цифровой термограф НОВО компании *Onset* имеет точность  $0,21^{\circ}\text{C}$  в диапазоне  $0\text{--}50^{\circ}\text{C}$  и разрешение  $0,02^{\circ}\text{C}$  при температуре  $25^{\circ}\text{C}$ , а также 64 Кбайт памяти ( $\sim 42000$  12-битных температурных измерений). Регистрация температуры на станциях проводилась с дискретностью 1 мин. Продолжительность измерений составила чуть более 10 сут.

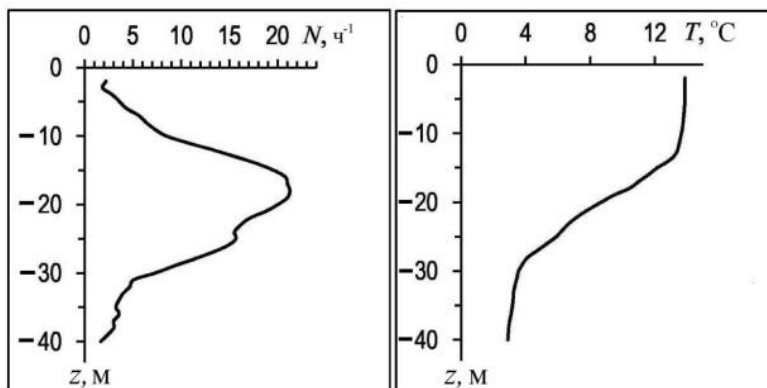
На рис. 2 показаны 5-суточная реализация температуры на горизонте  $z = -24$  м, зарегистрированной термографом ПБС, и ее низкочастотный тренд. Здесь же представлена реализация высокочастотных колебаний температуры.

В районе постановки буйковых станций 13.09.2013 г. было выполнено 8 гидрологических зондирований с дискретностью 3 ч. Зондирования выполнялись с помощью канадского зонда *RBR XRX-620*.



**Р и с. 2.** Температура в районе ПБС (1), ее низкочастотный тренд (кривая белого цвета) и высокочастотные пульсации (2)

**F i g. 2.** Temperature near the moored buoy station (1), its low-frequency trend (white color graph) and high-frequency pulsations (2)



**Р и с. 3.** Среднесуточные профили частоты плавучести ( $N$ ) (слева) и температуры ( $T$ ) (справа) в районе расположения буйковой станции

**F i g. 3.** Mean daily profiles of buoyancy frequency ( $N$ ) (left) and temperature ( $T$ ) (right) in the vicinity of buoy station

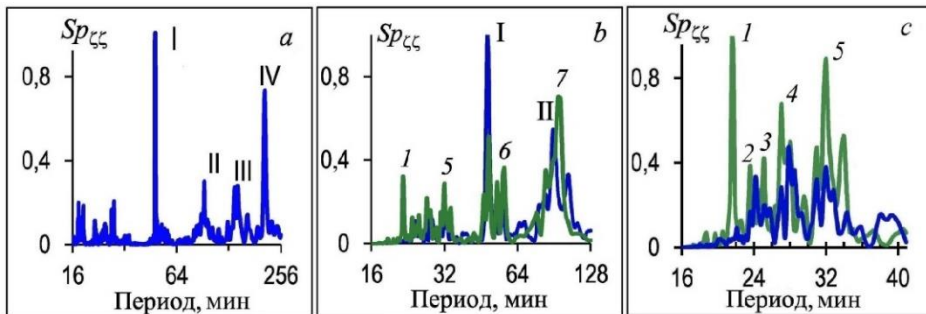
На рис. 3 (слева) показан характерный для осеннего сезона профиль частоты плавучести в заливе Посьета. Представленный профиль  $N(z)$  использовался для расчета фазовой скорости низшей моды ВВ с частотами сейшевых колебаний залива. Анализ среднесуточного профиля температуры (рис. 3, справа) показал, что фоновые условия на горизонте  $z_1 = -24$  м в период эксперимента в окрестности ПБС характеризовались квазилинейной зависимостью температуры от глубины.

### Методика спектральной обработки данных и ее результаты

Характерные временные масштабы сейшевых колебаний уровня ( $\zeta$ ) и пульсаций температуры ( $T$ , °C) морских вод в заливе, вызванных внутренними волнами, определялись с помощью методов стандартного спектрально-

го анализа <sup>3</sup> [11]. Разделение колебаний  $\zeta$  и  $T$  на высокочастотную составляющую и низкочастотный тренд выполнялось с использованием фильтра Хэмминга с окном длительностью 256 мин. Полученные после фильтрации реализации низкочастотного тренда служили фоном для определения частот внутренних волн и сейшевых колебаний с периодами 8–256 мин. Реализации с частотами сейшевых колебаний рассчитывались как разность между исходными реализациями уровня и температуры и реализациями низкочастотного тренда  $\zeta$  и  $T$ . Полученные в итоге временные ряды колебаний  $\zeta$  и  $T$  использовались для расчета спектральных плотностей (далее – спектров) колебаний уровня ( $Sp_{\zeta\zeta}$ ) и пульсаций температуры ( $Sp_{TT}$ ).

Спектры колебаний уровня залива нормированы на максимальное значение, которое приходится на период  $\sim 47$  мин (рис. 4, *a, b*) и на период  $\sim 22$  мин (рис. 4, *c*). Спектр с максимумом, расположенным на периоде  $T_0 \sim 47$  мин, и спектр с менее выразительным широкополосным максимумом на периоде  $T_1 \sim 93$  мин показаны синим цветом. Зеленым цветом выделен спектр с доминирующим максимумом, расположенным на периоде  $T_7 \sim 96$  мин (рис. 4, *b*), и доминирующим максимумом на периоде  $T_1 \sim 22$  мин (рис. 4, *c*). Спектр на рис. 4, *a* рассчитан по двухнедельной реализации, на рис. 4, *b, c* – по двум последовательным недельным реализациям, полученным в октябре 2001 г.



**Р и с. 4.** Нормированные спектры колебаний уровня залива Посыета в августе 2003 г. (*a*) и в октябре 2001 г. (*b, c*)

**Fig. 4.** Normalized spectra of Posyet Bay level fluctuations in August 2003 (*a*) and October 2001 (*b, c*)

Спектр на рис. 4, *a* характеризуется дельтообразным максимумом на периоде  $T_0 \sim 47$  мин, отмеченным римской цифрой I, и менее интенсивным, отмеченным цифрой II, широкополосным максимумом на периоде  $T_1 \sim 96$  мин. В диапазоне периодов, превышающих 100 мин, зафиксированы два максимума, отмеченные римскими цифрами III и IV.

Рассмотрим приведенные на рис. 4, *b, c* спектры, полученные в 2001 г. по двум последовательным 7-суточным реализациям. В диапазоне периодов 16–128 мин цифрами 1, 2, ..., 7 пронумерованы соответствующие максимумы. Приведем значения периодов, на которых эти максимумы располагаются:

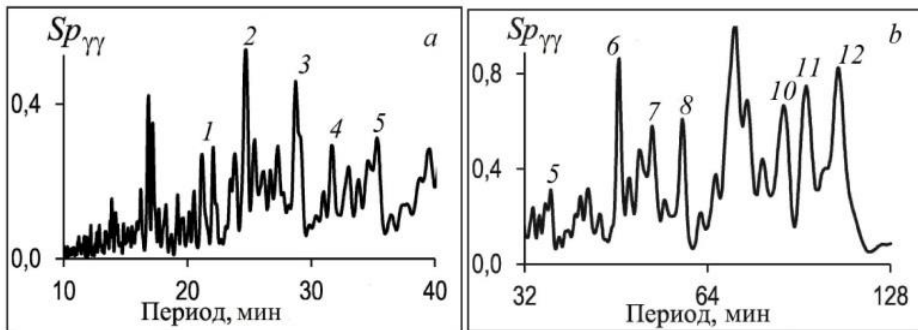
<sup>3</sup> Драган Я. П., Рожков В. А., Яворский И. Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. 320 с.

Максимумы спектра	1	2	3	4	5	6	7
$T_m$ , мин	22	24	25	27	32	47	96

Таким образом, в результате спектрального анализа было установлено интенсивное проявление колебаний уровня в заливе на частотах  $\nu_0 \sim 47 \text{ мин}^{-1}$  и  $\nu_0^+ \sim 1/96 \text{ мин}^{-1}$  и менее интенсивное проявление на частотах  $\nu_1 \sim 1/32 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\nu_2 \sim 1/27 \text{ мин}^{-1}$  и  $\nu_3 \sim 1/25 \text{ мин}^{-1}$ .

Рассмотрим спектральный состав пульсаций температуры в заливе. Приведем результаты расчета энергетического спектра этих пульсаций в диапазонах 10–40 и 32–128  $\text{мин}^{-1}$ , т. е. в тех же диапазонах, что и колебания его уровня. Спектральный анализ выполнялся по реализации высокочастотных пульсаций температуры, зарегистрированных термографом ПБС на горизонте  $z_1 = -20 \text{ м}$  (рис. 2).

На рис. 5 показан спектр, нормированный на максимальное значение пульсаций температуры, зарегистрированной на горизонте  $z = -24 \text{ м}$  с помощью ПБС. Цифрами 1–12 обозначены номера соответствующих максимумов спектра, которые располагаются на низкочастотном фоне, что свидетельствует о модуляции этих пульсаций низкочастотной составляющей.



**Р и с. 5.** Нормированный спектр пульсаций температуры в диапазонах 10–40 мин (a) и 32–128 мин (b)

**F i g. 5.** Normalized spectrum of temperature pulsations in the ranges 10–40 min (a) and 32–128 min (b)

Приведем значения периодов  $T_m$  (мин) максимумов спектра  $Sp_{TT}$ , показанного на рис. 5:

Максимумы спектра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_m$ , мин	22	25	28	32	35	46	52	58	71	85	93	105

На спектрах, прежде всего, обращают на себя внимание узкополосный максимум на частоте  $\nu_0 \sim 1/46 \text{ мин}^{-1}$  с  $m = 6$ . Кроме этого, следует также отметить, что максимумы на частотах  $\nu_1 \sim 1/25 \text{ мин}^{-1}$  и  $\nu_2 \sim 1/28 \text{ мин}^{-1}$  близки к максимумам на частотах сейшевых колебаний залива  $\sim 1/25 \text{ мин}^{-1}$  и  $\sim 1/27 \text{ мин}^{-1}$ .

Анализируя спектр пульсаций температуры, представленный на рис. 3, а, отметим, что разности между частотами  $\nu_1 - \nu_0$  и  $\nu_2 - \nu_0$  близки к частотам максимумов в спектре на периодах 52 и 71 мин<sup>-1</sup>. Другими словами, для частот, соответствующих этим периодам, выполняются следующие приближенные соотношения:  $\nu_1 - \nu_0 \sim 1/55$  мин<sup>-1</sup> и  $\nu_2 - \nu_0 \sim 1/72$  мин<sup>-1</sup>. Следует заметить также, что частоты  $\nu_0 \sim 1/46$  мин<sup>-1</sup>,  $\nu_1^- \sim 1/105$  мин<sup>-1</sup>,  $\nu_2^- \sim 1/180$  мин<sup>-1</sup>, в окрестности которых располагаются максимумы спектра, удовлетворяют приближенным выражениям  $\nu_n \sim \nu_0 + \nu_n^-$ , где  $n$  равно 1 и 2,  $\nu_1 \sim 1/32$  мин<sup>-1</sup> и  $\nu_2 \sim 1/37$  мин<sup>-1</sup>.

Отмеченные особенности спектров в районе постановки буйковой станции могут служить косвенным указанием на параметрическую неустойчивость внутренней волны, вызванную в том числе сейшевыми колебаниями.

### Параметрическое возбуждение внутренних волн в неглубоком морском бассейне сейшевыми колебаниями его свободной поверхности

Введем прямоугольную систему координат с осью  $z$ , направленной вертикально вверх, ось  $x$  совместим с направлением скорости баротропного одномерного потока стратифицированной жидкости. Система уравнений гидродинамики для достаточно длинных линейных ВВ в приближении Буссинеска в указанном потоке имеет следующий вид [4, 10]:

$$D_0 u = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - b = 0, \quad (1)$$

$$D_0 \rho = w \frac{d\rho_0}{dz}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $D_0 = \partial/\partial t + U\partial/\partial x$ ,  $U$  – скорость баротропного потока;  $u$  и  $w$  – горизонтальная и вертикальная компоненты орбитальной скорости внутренней волны;  $p$  и  $\rho$  – волновые возмущения давления и плотности;  $\rho_0(z)$  – средняя плотность слоя жидкости;  $b = \rho g/\rho_0$  – волновые флуктуации плавучести на единицу объема. Систему уравнений (1), (2) преобразуем к одному уравнению для  $u$  следующего вида:

$$D_0^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{2}{N} \frac{dN}{dz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + N^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad (3)$$

где  $N(z) = (gd \ln \rho_0 / dz)^{1/2}$  – частота плавучести.

Поскольку система уравнений (1), (2) однородна по горизонтали, решение уравнения (3) описывается суперпозицией мод ВВ произвольной формы  $u_m \sim \psi(c_m t) \varphi_m(z) \exp(ikx)$ . В этом выражении  $\psi_m(t)$  – амплитудная функция волновой моды с номером  $m$ ;  $\varphi_m(z)$  и  $c_m$  – собственная функция и собственное значение краевой задачи

$$\frac{d^2\varphi_m}{dz^2} - \frac{2}{N} \frac{dN}{dz} \frac{d\varphi_m}{dz} + \frac{N^2}{c_m^2} \varphi_m = 0, \quad \varphi_m(0) = \varphi_m(-H) = 0. \quad (4)$$

Здесь принято, что дно ( $z = -H$ ) и свободная поверхность ( $z = 0$ ) представляют собой твердые стенки.

Для функции  $\psi_m(t)$  (далее индекс  $m$  опускаем, полагая  $m = 1$ ) с учетом ортогональности набора функций  $\varphi_m(z)$  после ряда преобразований получим уравнение

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + 2i(kU) \frac{d\psi}{dt} + \left[ (kU)^2 + (kc_{ph})^2 \right] \psi = 0, \quad (5)$$

которое редуцируем к нормальной форме, воспользовавшись преобразованием  $\psi(t) = \zeta(t) \exp(i \int kU dt)$ . В результате получим следующее уравнение для функции  $\zeta(t)$ :

$$d^2\zeta/dt^2 + \left[ (kc_{ph})^2 - i(k dU/dt)^2 \right] \zeta = 0. \quad (6)$$

Зададим скорость баротропного течения, пульсирующего с частотой  $\omega$ , следующим образом:  $U = u_0 \exp(i\omega t)$ . Тогда мнимое слагаемое в квадратных скобках уравнения (6) равно  $\omega kU$ . Представим решение уравнения (6) в виде суммы реальной и мнимой частей. В этом случае реальная часть решения (обозначим ее как  $\eta = \text{Re}(\zeta)$ ) удовлетворяет уравнению

$$d^2\eta/dt^2 + \Omega_0^2 (1 + \mu \sin(\Omega t)) \eta = 0, \quad (7)$$

где  $\mu = (u_0/c_{ph})(\Omega/\Omega_0)$ , а размерные величины (обозначены штрихами) имеют вид  $\eta = \eta'/H$ ,  $t = t'/N_{\max}$ ,  $\Omega = \omega/N_{\max}$ ,  $\Omega_0 = \omega_0/N_{\max}$ ,  $\omega_0 = kc_{ph}$  – частота внутренней волны.

Таким образом, при распространении внутренней волны фиксированной, (низшей) моды в пульсирующем с частотой  $\omega$  баротропном потоке реальная часть ее амплитудной функции эволюционирует согласно уравнению (7).

Уравнение (7) представляет собой известное уравнением Матье. Его общее решение имеет вид<sup>4</sup>

$$\eta(t) = C_1 \exp(-i\sigma t) \Phi(t) + C_2 \exp(-i\sigma t) \Phi(-t), \quad (8)$$

где  $C_1, C_2$  – константы;  $\Phi(t)$  и  $\Phi(-t)$  – периодические функции. Величина  $\sigma$  характеризует скорость роста решения (8), является комплексной функцией параметров  $\omega_0$  и  $\mu$ . В этом случае решение (8) экспоненциально растет со временем. Явление, заключающееся в нарастании колебаний параметров гидродинамической системы, называют параметрическим резонансом.

<sup>4</sup> Якубович В. А., Старжинский В. М. Параметрический резонанс в линейных системах. Москва: Наука, 1987. 328 с.

Покажем, что в морском бассейне под воздействием слабых периодических колебаний скорости баротропного потока  $U = u_0 \sin(\omega t)$ , создаваемого сейшевыми колебаниями уровня, возможна параметрическая генерация ВВ с фазовой скоростью  $c_{ph}$  при условии  $u_0^2 \ll c_{ph}^2$ . В процессе генерации амплитуда волны, заданная функцией  $\eta(t)$ , описывается уравнением (7). Будем искать решение этого уравнения в области основного демультимпликативного резонанса, т. е. при выполнении условия  $|\Omega_0 - \Omega/2| \leq \mu$  в виде

$$\eta(t) = A(t) \sin[\Omega t/2 - \theta(t)]. \quad (9)$$

Воспользовавшись методом усреднения Крылова – Боголюбова <sup>5</sup>, для амплитуды  $A$  и фазы  $\theta$  получаем систему уравнений

$$dA/dt = \varepsilon A \cos(2\theta), \quad d\theta/dt = \delta - \varepsilon \cos(2\theta), \quad (10)$$

где  $\varepsilon = -\mu\Omega_0/4$ ;  $\delta = \Omega_0 - \Omega/2$ . Система (10) обладает инвариантом

$$I = A^2(d\theta/dt) = \text{const}, \quad (11)$$

что позволяет ее легко проинтегрировать. При этом оказывается, что при выполнении условия  $\varepsilon^2 > \delta^2$  существует решение вида  $A \sim \exp(t\sqrt{\varepsilon^2 - \delta^2})$ .

В этом можно убедиться простой подстановкой указанного решения в уравнение (7). Таким образом, амплитуда фиксированной моды ВВ пропорциональна  $\exp(t\sqrt{\varepsilon^2 - \delta^2})$ , а условием ее экспоненциального роста малой амплитуды горизонтальной скорости волновых течений является условие  $|\delta| < \varepsilon$ , которое соответствует критерию параметрической неустойчивости колебаний маятника с вибрирующей точкой подвеса в отсутствие трения <sup>6</sup>. Кроме того, должны соблюдаться условия малости параметра  $\mu \ll 1$  и параметрического резонанса частот  $|\delta| < \min\{\mu, \varepsilon\}$ . Отсюда с учетом неравенства  $\mu \ll 1$  условие «раскачки» амплитуд внутренних волн однородным по глубине пульсирующим потоком с частотой  $\Omega$  и максимальным значением его скорости  $u_0$  принимает вид

$$|\Omega_0 - \Omega/2| = \Omega u_0 / 4c_{ph}. \quad (12)$$

Нетрудно заметить, что параметрический резонанс должен иметь место при любом  $\omega = n\omega_0/2$  (где  $n$  – целое число), в том числе и при  $n = 2$ . При этом границы второй зоны параметрической генерации определяются неравенствами из работы <sup>7</sup>:

$$-5\mu^2 \omega / 24 < \omega_0 - \omega < \mu^2 \omega / 4, \quad (13)$$

где  $\omega$  – частота пульсирующего баротропного течения.

<sup>5</sup> Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Введение в нелинейную механику. Киев : Издательство АН УССР, 1937. 363 с.

<sup>6</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. Москва : Наука, 1965. 204 с.

<sup>7</sup> Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. Москва : Наука, 1984. 432 с. EDN XUCRCL.

В заключение сформулируем необходимые и достаточные условия, при которых реализуется параметрическая генерация ВВ в неглубоком бассейне под воздействием модуляции ее горизонтальной компоненты скорости орбитального движения, вызванной баротропным течением сейшевых колебаний свободной поверхности бассейна.

Параметрическая генерация ВВ фиксированной моды с фазовой скоростью  $c_{ph}$  и волновым числом  $k$  в морском бассейне глубиной  $H$  полем стоячих поверхностных волн с частотой  $\omega$  возможна при выполнении следующих условий:

– длины внутренней ( $\lambda_{int}$ ) и поверхностной ( $\lambda_{sur}$ ) волн значительно превышают глубину бассейна  $H$ , т. е.  $H \ll \lambda_{int} \ll \lambda_{sur}$ , а частотный диапазон ВВ ограничен частотой  $\omega_*/2$ , где  $\omega_*$  – низшая частота сейшевых колебаний бассейна;

– фазовая скорость ВВ ( $c_{ph}$ ) значительно превышает максимальное значение скорости баротропного течения ( $u_0$ ), т. е. их отношение  $\mu = (u_0/c_{ph}) \ll 1$ . Расстройка между частотой ВВ  $\omega_0 = kc_{ph}$  и частотой сейшевых колебаний  $\omega$  не должна превышать произведения  $\mu\omega$ , т. е.  $|\omega_0 - \omega| < \mu\omega$ .

С использованием натуральных данных покажем, что в модельном бассейне с акваторией полукруглой формы, аппроксимирующем залив Посьета, в осенний сезон формируются необходимые и достаточные условия для возбуждения ВВ под воздействием параметрического резонанса, вызванного фундаментальной нулевой модой (модой Гельмгольца), а также первой, второй и последующими модами сейшевых колебаний водной массы залива.

### Обсуждение

Спектральный анализ пульсаций температуры, вызванных полем ВВ в заливе, показал, что ряд частот этих пульсаций близок к частотам сейшевых колебаний уровня. Следовательно, необходимое условие для параметрического возбуждения ВВ сейшевыми колебаниями выполнено.

В осенний период, для которого характерны интенсивные сейшевые колебания, выполнено достаточное условие для осуществления параметрического резонанса между волновыми движениями. Следовательно, в этот период в заливе Посьета под воздействием сейшевых колебаний возбуждаются ВВ.

Обратимся к данным натуральных измерений уровня в заливе. На рис. 4 показан характерный для октября спектр колебаний свободной поверхности залива в частотном диапазоне  $1/16$ – $1/256$  мин<sup>-1</sup>. На спектре выделяются два доминирующих максимума на периодах 47 и 92 мин и три менее выразительных максимума на периодах  $\sim 33$ ,  $\sim 28$  и  $\sim 25$  мин соответственно. Следует заметить, что отношение этих периодов к периоду  $T \sim 47$  мин составляет  $\sim 0,7$ ,  $\sim 0,6$  и  $\sim 0,5$ .

В ряде экспериментальных работ [12–15] установлено, что наибольшей интенсивностью в бассейне с полужамкнутой акваторией обладает мода Гельмгольца – продольное колебание уровня и скорости баротропного течения с периодом  $T_0$ , направленного по нормали к открытой границе. Для бассейнов простейшей формы периоды первой и последующих мод рассчитываются по формуле из работ [16, 17]



$$T_m = \alpha_m T_0 / (2m + 1), \quad (14)$$

где  $T_0$  – период моды Гельмгольца;  $\alpha_m$  – параметр, характеризующий форму бассейна;  $m$  – номер моды.

В работе [18] приведена таблица 2.1 с периодами продольных мод свободных колебаний в бассейнах простейшей формы. Согласно этой таблице, в бассейне полукруглой формы с профилем глубины, заданным зависимостью  $h(x) = h_1(1 - x^2/L^2)$ , отношение  $\alpha_m/(2m+1)$  равно  $\sim 0,7$ ,  $\sim 0,6$  и  $\sim 0,5$  для  $m$ , равных 1, 2 и 3 соответственно. Период моды Гельмгольца для такого бассейна рассчитывается по формуле

$$T_0 = 2,2 \cdot 2L / \sqrt{gh_1}, \quad (15)$$

где  $h_1$  – глубина на входе бассейна;  $L$  – его длина, равная радиусу акватории бассейна.

Предположим, что максимум в спектре колебаний уровня принадлежит моде Гельмгольца, в этом случае  $T_0 = 47$  мин. Тогда периоды первой, второй и последующих мод равны 33, 28 и 24 мин. Определив период самого интенсивного колебания ( $T_0$ ) свободной поверхности и зная глубину бассейна на входе ( $h_1$ ), нетрудно определить его длину. Воспользовавшись соотношением (15), получим выражение  $L = (gh_1)^{1/2} (T_0/4,44)$ . Отсюда длина бассейна  $L$  при глубине на его входе  $h_1 \sim 45$  м и периоде моды Гельмгольца  $T_0 = 47$  мин составит  $\sim 13,5$  км.

На карте-схеме залива Посьета (рис. 1) показана акватория полукруглой формы с диаметром и глубиной на входе  $\sim 28$  км и  $\sim 45$  м соответственно. Согласно рис. 1, геометрические размеры модельного бассейна, а также его форма и профиль дна в первом приближении удовлетворительно согласуются с размерами и формой залива Посьета.

В неглубоких заливах и гаванях наряду с продольными колебаниями присутствуют и поперечные сейшевые колебания [19]. В дальнейшем нам потребуются периоды первой и последующих мод этого типа колебаний. Для рассматриваемого бассейна период первой моды рассчитывается по формуле  $\tau_1 = \tau_{\max} / \sqrt{2}$ . В этом выражении  $\tau_{\max} = 8,88L / \sqrt{gh_1}$ . Следовательно, для указанных параметров бассейна период первой поперечной сейши  $\tau_1$  составит 70 мин.

Таким образом, в модели морского бассейна полукруглой формы с квадратичным профилем дна мода Гельмгольца, первая и последующие моды имеют периоды 47, 34, 29 и 24 мин. В этом же бассейне первая и последующие моды поперечных сейш имеют периоды, близкие к  $\tau_1 = 70$  мин,  $\tau_2 = 44$  мин,  $\tau_3 = 31$  мин,  $\tau_4 = 24$  мин.

Обратимся к анализу частотного состава внутренних волн в районе исследования. На рис. 5 представлен спектр пульсаций температуры, вызванных этими волнами. Спектр рассчитан в диапазоне периодов 10–128 мин, общем с диапазоном периодов сейшевых колебаний. Цифрами на спектре выделены его максимумы, периоды которых близки к периодам максимумов в спектре колебаний свободной поверхности залива, т. е. его сейшевых колебаний.

Расчеты, выполненные с использованием профиля частоты плавучести (рис. 3), показали, что фазовая скорость первой моды ВВ лежит в интервале  $0,15-0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , а длина волны  $\lambda_{in}$  с периодом  $T_{in} \sim 15$  мин составляет  $\sim 300$  м. Следовательно, залив является мелким морским бассейном для ВВ с периодами, превышающими 15 мин.

Покажем, что морской бассейн с глубиной на входе 45 м является мелким для поверхностной волны с периодом  $T_{sr} \sim 15$  мин. Длина поверхностных волн  $\lambda_{sr}$  (равная  $(gh_1)^{1/2} T_{sr}$ ) с этим периодом составляет  $\sim 19$  км, что значительно превышает  $\lambda_{in}$ . Следовательно, залив является морским бассейном, в котором выполняется неравенство  $\lambda_{sr} \gg \lambda_{in} \gg H$ , т. е. он является мелким бассейном как для поверхностных, так и для внутренних волн с частотами из частотного диапазона сейшевых колебаний.

Достаточное условие для «раскачки» амплитуд внутренних волн с периодом  $T_{int}$  сейшевыми колебаниями с периодом  $T_{sr}$  с учетом (12) примет следующий вид:

$$|1 - 2T_{sr}/T_{int}| \leq \mu / 2, \quad (16)$$

где  $\mu = (u_0/c_{ph})$ .

Покажем, что амплитуда внутренней волны с фазовой скоростью  $c_{ph} \sim 0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и периодом  $T_{int} \sim 93$  мин параметрически «раскачивается» модой Гельмгольца с амплитудой  $\zeta_0 \sim 0,1$  м и периодом  $T_{sur} \sim 47$  мин в зоне основного резонанса. С этой целью выполним проверку достаточного условия для реализации этого процесса. Условие (12) представим в виде

$$\delta T/T_{int} \leq (u_0/c_{ph})(T_{int}/T_{sur})/2, \quad (17)$$

где  $\delta T = (T_{int} - 2T_{sur})$  – расстройка периода;  $u_0 = \zeta_0 \sqrt{g/H}$  – максимальная скорость баротропного течения, создаваемого модой Гельмгольца. Воспользовавшись заданными значениями, получим  $\delta T/T_{int} \sim 10^{-2}$ ,  $u_0/c_{ph} \sim 2,5 \cdot 10^{-1}$ . Таким образом, правая часть соотношения (17) составит  $\sim 0,2$ , что на порядок превышает значение левой части этого соотношения. Следовательно, достаточное условие экспоненциального роста амплитуды волны с периодом 93 мин и фазовой скоростью  $\sim 0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  выполнено.

Выполним проверку достаточного условия, при котором возможно возбуждение ВВ с частотами сейшевых колебаний залива, т. е. параметрическое возбуждение волн в первой зоне параметрического резонанса. Представим это условие в соответствии с (13) в виде

$$\delta T \leq (u_0/c_{ph})^2 T_{int} / 2.$$

Согласно работам [16, 17],  $u_0 = \eta_0 \sqrt{g/H}$ , тогда  $u_0 \sim 0,047 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Учитывая, что  $c_{ph} \sim 0,25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , получим  $(u_0/c_{ph})^2 \sim 0,035$ . Отсюда расстройка периода внутренней волны с  $T_{int} = 47$  мин не должна превышать 0,5 мин.

Очевидно, что проверка достаточного условия (13) с использованием данных натурального эксперимента весьма сложная в методическом плане задача. Относительная стабильность частоты возбуждения внутренней волны с периодом 47 мин, равная отношению  $\delta T/T_{int}$ , составляет  $\sim 1\%$ , что в морских условиях на интервале возбуждения, верхняя граница которого  $\sim 8$  ч, маловероятно.

Вместе с тем возбуждение внутренних волн в первой зоне параметрического резонанса возможно в рамках следующей схемы. Заметим, что периоды самых значительных максимумов спектра  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$  равны 17, 25, 29 и 47 мин соответственно. На эти же периоды приходятся близкие к предыдущим периоды 16, 26, 30 и 44 мин гармоник полусуточного прилива с периодом 12,4 ч.

В работе [18] было установлено, что в заливе Посьета приливная ВВ с полусуточным периодом в процессе распространения изменяет свою форму, т. е. скорость частиц жидкости на ее вершине превышает скорость частиц в подошве. В спектральном описании волнового движения это означает появление в спектре максимумов на периодах  $T_n = 12,4/n$  (ч), где  $n = 1, 2, 3, \dots$ , – номер гармоники. Следовательно, при распространении в волновом поле стоячих поверхностных волн с частотами сейшевых колебаний между этим полем и соответствующими гармониками приливной внутренней волны с частотой  $1/12,4$  ч<sup>-1</sup> возможен параметрический резонанс.

Другими словами, в процессе распространения в мелководную зону залива, охваченную сейшевыми колебаниями, полусуточная приливная ВВ под действием квадратичной нелинейности трансформируется из гармонической волны с частотой  $\nu = 1/12,4$  ч<sup>-1</sup> в полигармоническую волну с частотами гармоник  $\nu_n = n\nu$ . При близких значениях между частотами сейшевых колебаний и частотами гармоник приливной ВВ наступает параметрический резонанс, т. е. экспоненциальное возрастание амплитуд соответствующих гармоник приливной ВВ.

Таким образом, при наличии достаточно интенсивных сейшевых колебаний уровня и слабо нелинейной ВВ с частотой  $\nu = 1/12,4$  ч<sup>-1</sup> в заливе реализуется достаточное условие для параметрической генерации в первой зоне параметрического резонанса ВВ с частотами сейшевых колебаний.

### Заключение

В настоящей работе проанализированы результаты натурных исследований в заливе Посьета стоячих поверхностных и свободных внутренних волн из частотного диапазона  $1/16$ – $1/256$  мин<sup>-1</sup>. С использованием Фурье-анализа определены частоты, на которые приходятся самые значительные максимумы в спектрах как поверхностных, так и внутренних волн в указанном частотном диапазоне. Установлена близость ряда частот, на которых располагаются эти максимумы в спектрах указанных волновых процессов.

С использованием модельного бассейна, аппроксимирующего залив Посьета, были получены оценки периодов моды Гельмгольца и последующих мод в таком бассейне. Анализ спектра колебаний свободной поверхности залива показал, что его максимумы приходятся на указанные выше периоды, которые являются периодами свободных колебаний уровня или сейш залива.

Таким образом, в заливе в осенний период формируются необходимые условия параметрической неустойчивости внутренних волн, вызванные сейшевыми колебаниями уровня.

В рамках теории параметрического резонанса было установлено, что под воздействием баротропного течения, вызванного сейшевыми колебаниями, происходит модуляция горизонтальной компоненты скорости орбитального движения внутренней волны. При соответствующем отношении  $u_0/c_{ph} \ll 1$  в заливе реализуется достаточное условие параметрического возбуждения внутренних волн в нулевой зоне параметрического резонанса.

В рамках этой же теории было показано, что в заливах и бухтах окраинных морей возможно возбуждение внутренних волн в первой зоне параметрического резонанса с частотами гармоник внутренней волны с частотой  $\nu_{id} = 1/12,4 \text{ ч}^{-1}$ . Условием этого резонанса является близость частот моды Гельмгольца и последующих мод бассейна к частотам гармоник внутреннего прилива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rates and mechanisms of turbulent dissipation and mixing in the Southern Ocean: Results from the Diapycnal and Isopycnal Mixing Experiment in the Southern Ocean (DIMES) / K. L. Sheen [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 6. P. 2774–2792. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20217>
2. *MacIntyre S.* Vertical mixing in a shallow, eutrophic lake: Possible consequences for the light climate of phytoplankton // *Limnology and Oceanography*. 1993. Vol. 38, iss. 4. P. 798–817. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.4.0798>
3. Резонансное возбуждение короткопериодных внутренних волн баротропными сейшами в покрытом льдом мелководном озере / С. Ю. Волков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 4. С. 407–423. EDN EUVONQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-407-423>
4. *LeBlond P. H., Mysak L. A.* Waves in the Ocean. Amsterdam, Oxford, New York : Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 602 p. (Elsevier Oceanography Series ; vol. 20).
5. *McEwan A. D., Robinson R. M.* Parametric instability of internal gravity waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1975. Vol. 67, iss. 4. P. 667–687. <https://doi.org/10.1017/S0022112075000547>
6. *Stepanov D. V., Novotryasov V. V.* Sub-inertial modulation of nonlinear Kelvin waves in the coastal zone // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2013. Vol. 20, iss. 3. P. 357–364. <https://doi.org/10.5194/npg-20-357-2013>
7. *Novotryasov V., Filonov A., Lavin M. F.* Nonlinear internal tidal waves in a semi-enclosed sea (Gulf of California) // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38, iss. 24. L24611. <https://doi.org/10.1029/2011GL049886>
8. *Новотрясов В. В., Павлова Е. П.* Определение параметров низкочастотных внутренних волн в прибрежной зоне окраинного моря с использованием натуральных измерений на основе нелинейной теории // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 4. С. 82–86. EDN NWASCT.
9. *Лайтхилл Д.* Волны в жидкостях. Москва : Мир, 1981. 598 с.
10. *Miropol'sky Yu.* Dynamics of Internal Gravity Waves in the Ocean / Ed. O. D. Shishkina. Dordrecht : Springer, 2001. 406 p. (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library ; vol. 24).
11. *Thomson R. E., Emery W. J.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science, 2001. 654 p.

12. *Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations. Chapter 9 // Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y. C. Kim. Singapore : World Scientific Publishers, 2009. P. 193–236. [http://dx.doi.org/10.1142/9789812819307\\_0009](http://dx.doi.org/10.1142/9789812819307_0009)
13. Study of Free Oscillations of Bays in the Northwestern Part of Posyet Bay / V. Chupin [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 8. 1005. <https://doi.org/10.3390/jmse10081005>
14. Исследование резонансных колебаний в восточной части залива Посьета / С. В. Смирнов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 37–44. EDN YPPJMR.
15. Собственные колебания уровня воды в бухтах залива Посьета Японского моря / Г. И. Долгих [и др.] // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 57–63. EDN WIMTMB.
16. *Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В.* Исследование сейшевых колебаний в бухте со свободным входом // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 4. С. 16–25. EDN ZMNTTL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-4-16-25>
17. *Иванов В. А., Манилюк Ю. В., Санников В. Ф.* Сейши в бассейне с открытым входом // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 4. С. 23–30. EDN XTUVKX. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180404>
18. *Рабинович А. Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 326 с.
19. *Wilson B. W.* Seiches // Advances in Hydrosience. 1972. Vol. 8. P. 1–94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-021808-0.50006-1>

*Об авторе:*

**Новотрясов Вадим Васильевич**, ведущий научный сотрудник отдела физики океана и атмосферы, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, доцент, **SPIN-код: 4584-8071**, **ORCID ID: 0000-0003-2607-9290**, [vadimnov@poi.dvo.ru](mailto:vadimnov@poi.dvo.ru)

Научная статья

УДК 551.465  
EDN: NHICEB

## Сравнительное численное моделирование волн цунами при землетрясении 1 января 2024 года на полуострове Ното, Япония

Р. Х. Мазова<sup>1</sup>, А. А. Мартыненко<sup>2</sup>, А. А. Куркин<sup>1, 3, ✉</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Автономная некоммерческая организация высшего образования «Центральный университет», Москва, Россия

<sup>3</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия  
✉ aakurkin@gmail.com

Поступила в редакцию 17.07.2024; одобрена после рецензирования 29.07.2024; принята к публикации 12.09.2024.

### Аннотация

**Цель.** Проведено сравнительное численное моделирование генерации и распространения волн цунами, порожденных очагом землетрясения магнитудой  $M = 7,6$  1 января 2024 г. на полуострове Ното, в префектуре Исекава, Япония.

**Методы и результаты.** Моделирование проведено для четырех различных вариантов сейсмического очага в рамках блочно-клавишного механизма очага землетрясения. Был рассмотрен многоблочный очаг, в котором при моделировании землетрясения задавалось последовательное движение блоков-клавиш. Показано, что динамика данного процесса в сейсмическом очаге будет определять формирование соответствующего очага цунами и волновых фронтов, распространяющихся от этого очага, а также что форма очага землетрясения существенно влияет на значения максимальных высот волн в акватории. С использованием информации с приливных станций Японского моря, пролива Цугару и Татарского пролива выполнено сравнение максимальных значений амплитуд волн цунами из реальных записей на этих станциях и расчетных мареограмм, полученных в результате численного моделирования при различной динамике блоков в сейсмическом очаге.

**Выводы.** Показано, что с помощью клавишной модели землетрясения возможно адекватно моделировать даже сложные очаги такого землетрясения, как произошедшее на северо-западе полуострова Нота, на западном побережье о. Хонсю, где, кроме большого количества населенных пунктов, находятся крупнейшие действующие японские АЭС.

**Ключевые слова:** цунами 2024, полуостров Ното, Япония, очаг землетрясения, численное моделирование

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, грант Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-1127 от 01.07.2022.

**Для цитирования:** Мазова Р. Х., Мартыненко А. А., Куркин А. А. Сравнительное численное моделирование волн цунами при землетрясении 1 января 2024 года на полуострове Ното, Япония // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 706–722. EDN NHICEB.

© Мазова Р. Х., Мартыненко А. А., Куркин А. А., 2024

## Comparative Numerical Simulation of Tsunami Waves during the January 1, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan

R. Kh. Mazova<sup>1</sup>, A. A. Martynenko<sup>2</sup>, A. A. Kurkin<sup>1, 3, ✉</sup>

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education “Central University”, Moscow, Russia

<sup>3</sup> V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

✉ aakurkin@gmail.com

### Abstract

*Purpose.* The purpose of the work consists in performing a comparative numerical simulation of generation and propagation of tsunami waves induced by the  $M = 7.6$  earthquake on January 1, 2024 on the Noto Peninsula, Ishikawa Prefecture, Japan.

*Methods and Results.* Four different variants of a seismic source are simulated within the framework of the earthquake source keyboard mechanism. A multi-block source is considered, in which, while modeling the earthquake, a sequential motion of key-blocks was specified. It is shown that the dynamics of this process in a seismic source will determine the formation of corresponding tsunami source and wave fronts propagating from this source, and that the shape of earthquake source significantly affects the values of maximum wave heights in the water area. Applying the information from the tide-gauge stations in the Sea of Japan, and the Tsugaru and Tatar straits permits to compare the real records of maximum values of the tsunami wave amplitudes at these stations and the computed tide-gauge ones resulted from numerical modeling of different dynamics of keyboard blocks in the seismic source.

*Conclusions.* It is shown that using the keyboard model of earthquakes, one can adequately simulate even such complex earthquake sources as the one that occurred in the northwest of the Noto Peninsula and on the western coast of Honshu Island where, besides a great number of settlements, the largest Japanese operating nuclear power plants are located.

**Keywords:** 2024 tsunami, Noto Peninsula, Japan, earthquake source, numerical simulation

**Acknowledgments:** The study was supported by the Laboratory of nonlinear hydrophysics and natural disasters of POI n. a. R. E. Alekseev, FEB of RAS, grant of the Ministry of Science and Higher Education of RF, agreement No. 075-15-2022-1127 dated July 1, 2022.

**For citation:** Mazova, R.Kh., Martynenko, A.A. and Kurkin, A.A., 2024. Comparative Numerical Simulation of Tsunami Waves during the January 1, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 662-678.

### Введение

Хорошо известно, что Япония входит в десятку самых сейсмоопасных стран мира<sup>1</sup>. Расположенная в Тихоокеанском огненном кольце, страна за всю свою историю пережила множество разрушительных землетрясений, таких как, например, землетрясение 17 января 1995 г. с магнитудой 7,3 на западе японского острова Хонсю, в результате которого погибло более 6,4 тыс. человек [1]; землетрясение 11 марта 2011 г. магнитудой 9 с последующим цунами

---

<sup>1</sup> ‘Battle against time’ to find quake survivors as Japan lifts tsunami warnings and death toll rises / H. Regan [et al.] // CNN : site. 2024. 2 Jan. URL: <https://edition.cnn.com/2024/01/02/asia/japan-earthquake-tsunami-warnings-tuesday-intl-hnk/index.html> (дата обращения: 28.02.2024).

высотой от 3 до 15 м, обрушившимся на побережья о-вов Хонсю и Хоккайдо. В результате этого стихийного бедствия<sup>2</sup> погибло более 28 тыс. человек и произошло загрязнение обширных территорий радиоактивными веществами от АЭС «Фукусима I» [2, 3].

Высокая сейсмическая активность связана с тем, что архипелаг расположен на стыке сразу нескольких литосферных плит, две из которых – Филиппинская и Тихоокеанская – находятся в движении. Это приводит к значительному количеству интенсивных подземных толчков, которые, как правило, сопровождаются землетрясениями и цунами. В год в Японии происходит несколько тысяч землетрясений, в среднем 18 толчков в день. Однако сильные землетрясения, сопровождающиеся цунами, бывают значительно реже: раз в 10 лет – с магнитудой  $M = 8$ , раз в год – с  $M = 6$  (см. на сайтах<sup>1, 3, 4</sup> и в работе [4]).

Мы рассматриваем сильное землетрясение ( $M = 7,6$ ), произошедшее 1 января 2024 г. на п-ове Ното в префектуре Исикава, Япония. В результате серии подземных толчков были вызваны массовые разрушения в городах Судзу, Ваджима, Ното и Анамидзу. При этом в соседних префектурах Тояма и Ниигата также зафиксирован значительный ущерб. В результате этого землетрясения в ряде регионов о-ва Хонсю была объявлена угроза цунами. Японским метеорологическим агентством была выпущена карта предупреждения о цунами, по которой, предположительно, к западному побережью острова волны цунами должны были подойти высотой 5 м (рис. 1).

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования генерации волн цунами сейсмическим очагом, сформированным в рамках блочно-клавишной модели очага землетрясения [5]. С начальными движениями дна при землетрясении связана наибольшая неопределенность в расчете возможных сценариев развития цунами. При использовании блочно-клавишной модели задание перемещений и скоростей дна во время землетрясения обеспечивает решение задачи о формировании волны цунами. При этом движение блоков-клавиш моделируется согласно афтершоковой стадии процесса. После окончания афтершоковой стадии развития блоки останавливаются. При сильнейших землетрясениях, имеющих длину разрыва в несколько сотен километров, их очаги могут охватывать множество блоков.

В данной работе рассмотрен пятиблочный очаг землетрясения, генерация очага цунами при различной локализации сейсмического очага и различных кинематических процессах движения блоков-клавиш в очаге. Анализ волновых характеристик, полученных при моделировании различных локализаций и различной динамики сейсмического очага, приводит к выводам о неоднородности выбранной модели процесса.

---

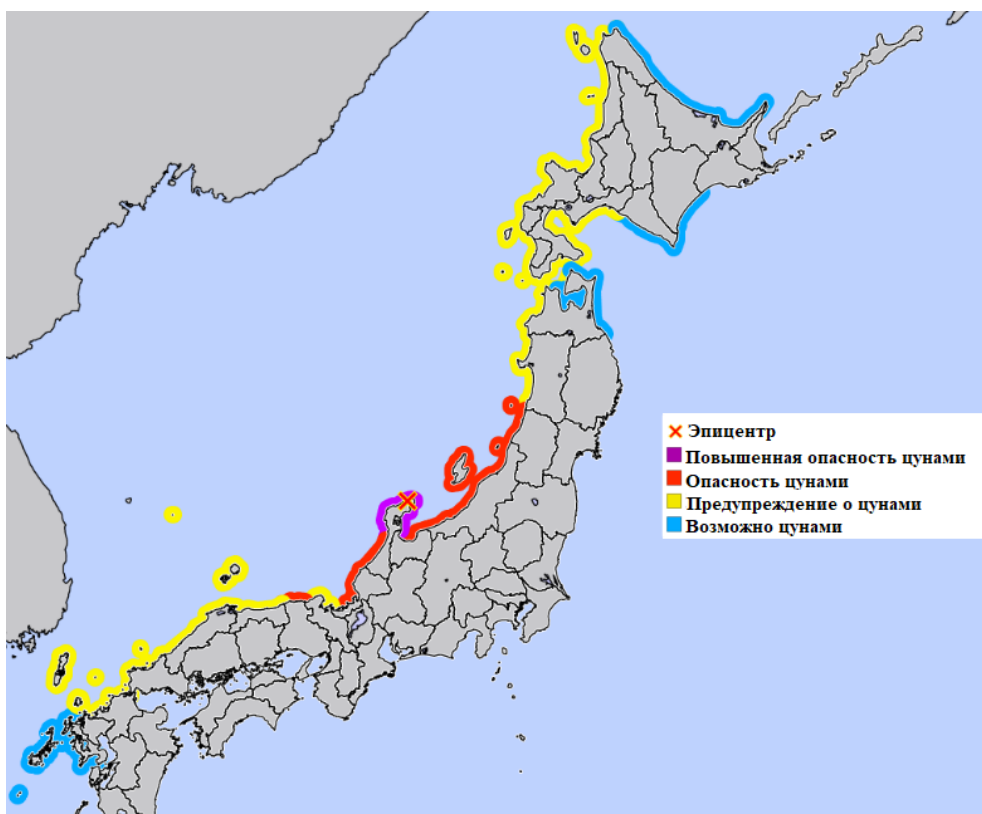
<sup>2</sup> Хронология землетрясений с погибшими в Японии // TASS : сайт. 2024. 2 янв. URL: <https://tass.ru/info/19667253> (дата обращения: 28.09.2024).

<sup>3</sup> URL: <https://web.archive.org/web/20240101100413/https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#5/38.891/141.24/&elem=warn&contents=tsunami> (дата обращения: 10.05.2024).

<sup>4</sup> URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map> (дата обращения: 10.05.2024).



Цель работы – сравнительное численное моделирование генерации и распространения волн цунами, порожденных очагом землетрясения магнитудой  $M = 7,6$  1 января 2024 г. на п-ове Ното, в префектуре Исикава, Япония.



**Р и с. 1.** Карта цунамиопасности для о-ва Хонсю, выпущенная Японским метеорологическим агентством 1 января 2024 г. <sup>3</sup>

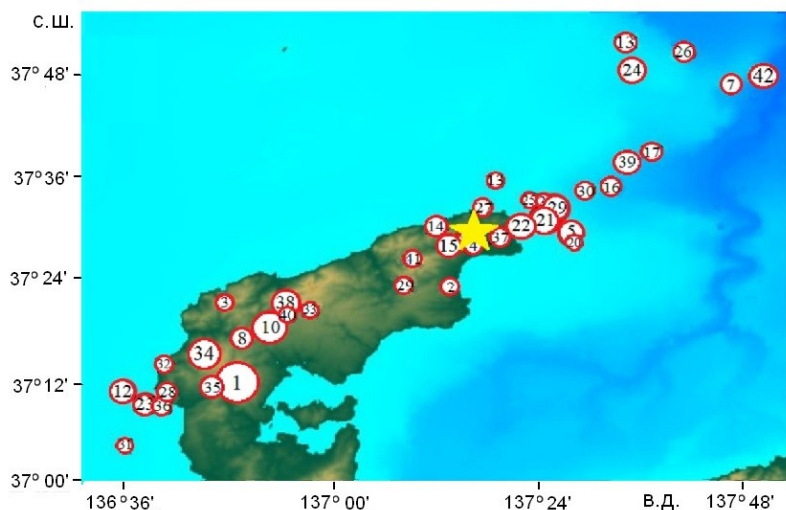
**F i g. 1.** Tsunami hazard map for Honshu Island published by the Japan Meteorological Agency on January 1, 2024 <sup>3</sup>

### Постановка задачи

#### *Афтершоковая стадия процесса*

Используя данные работ [6–9], мы проанализировали последовательность афтершоковой стадии процесса землетрясения. Данные об афтершоках были получены с *U.S. Geological Survey* <sup>5</sup> и приведены на рис. 2. После основного толчка землетрясения 01.01.2024 в 7:10:09 UTC в течение трех суток произошло еще 42 толчка с  $M > 4,5$  (табл. 1).

<sup>5</sup> URL: <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php> (дата обращения: 10.05.2024).  
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024



**Р и с. 2.** Афтершоки после землетрясения 01.01.2024 на п-ове Ното (желтая звездочка – эпицентр землетрясения; кружки с цифрами обозначают порядок афтершоков <sup>5)</sup>

**F i g. 2.** Aftershocks after the 01/01/2024 earthquake on the Noto Peninsula (yellow star is the earthquake epicenter; circles with numerals indicate the order of aftershocks <sup>5)</sup>

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Все афтершоки при  $M > 4,5$  после землетрясения 01.01.2024 с 01.01.2024 по 03.01.2024**  
**All aftershocks at  $M > 4.5$  from 01/01/2024 to 03/01/2024 after the earthquake on January 1, 2024**

№ п/п / s/n	$M$	Время (UTC) / Time (UTC)	№ п/п / s/n	$M$	Время (UTC) / Time (UTC)	№ п/п / s/n	$M$	Время (UTC) / Time (UTC)
0	7,5	7:10:09	15	4,9	8:22:10	30	4,6	17:33:30
1	6,2	7:18:41	16	4,7	8:29:02	31	4,5	19:27:14
2	4,6	7:27:28	17	4,6	8:42:04	32	4,6	19:42:06
3	4,6	7:28:15	18	4,5	8:48:21	33	4,5	22:13:30
4	4,7	7:29:04	19	5,5	9:03:48	34	5,4	1:17:31
5	5,2	7:39:49	20	4,6	9:06:13	35	4,8	6:57:54
6	4,8	7:42:43	21	5,6	9:08:17	36	4,6	8:13:40
7	4,7	7:45:30	22	5,2	9:30:21	37	4,8	17:21:47
8	4,8	7:48:14	23	5,0	9:39:59	38	5,3	1:54:34
9	4,7	7:54:21	24	5,1	9:54:26	39	4,9	3:54:13
10	5,6	7:56:47	25	4,6	9:49:15	40	4,7	9:48:00
11	5,0	8:02:44	26	4,6	10:06:54	41	4,6	15:36:53
12	5,1	8:07:10	27	4,7	10:50:35	42	4,8	19:38:41
13	4,5	8:15:38	28	4,6	11:35:32			
14	4,8	8:17:46	29	4,5	13:19:57			

*Формирование очага цунами в рамках клавишной модели сейсмического очага землетрясения*

Поскольку механизм формирования сейсмических очагов неизвестен, то, задавая механизм очага из тектонических соображений, базируясь на известных значениях магнитуды землетрясения и афтершоков, а также используя распределение афтершоков с  $M > 4,5$ , можно рассчитать ориентировочные размеры сейсмического источника и его динамику. Для расчета размеров источника используются формулы [10]

$$\begin{cases} \lg L = 0,59 M - 2,44, \\ \lg W = 0,32 M - 1,01, \end{cases}$$

где  $M$  – магнитуда землетрясения;  $L$  – протяженность разрыва в очаге, км;  $W$  – ширина плоскости разрыва, км.

Максимальное вертикальное смещение волновой поверхности над очагом землетрясения находится по формуле<sup>6</sup>

$$\lg(H) = 0,8M - 5,6,$$

где  $H$  – максимальная высота вертикального смещения волновой поверхности над очагом землетрясения, м. Оценочные смещения данных характеристик, используемые для моделирования очага цунами<sup>6</sup> [10], представлены ниже:

$M_w$	$L$ , км	$W$ , км	$S$ , км <sup>2</sup>	$H$ , м
7,5	$78 \pm 18$	$43 \pm 6$	$3354 \pm 440$	4,8

Для моделирования были приняты длина очага 78 км и ширина 43 км. Так как в силу несжимаемости жидкости и гидростатичности давления поверхность океана поднимется на ту же величину, на которую сместился блок на дне, а из формулы Ииды получено смещение 4,8 м, то максимальное вертикальное смещение блока в клавишном очаге землетрясения мы взяли 4,8 м.

*Математическая постановка задачи*

Рассматривается процесс генерации волн цунами в приближении теории мелкой воды. Для моделирования были использованы уравнения, описывающие нелинейную систему уравнений мелкой воды в двумерной постановке (см., например, работу<sup>7</sup> и [11]):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\eta + H - B)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\eta + H - B)v] = \frac{\partial B}{\partial t}. \end{array} \right.$$

<sup>6</sup> Пелиновский Е. Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький : ИПФАН СССР, 1982. 226 с.

<sup>7</sup> Вольцингер Н. Е., Клеванный К. А., Пелиновский Е. Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л. : Гидрометеоиздат, 1989. 272 с.

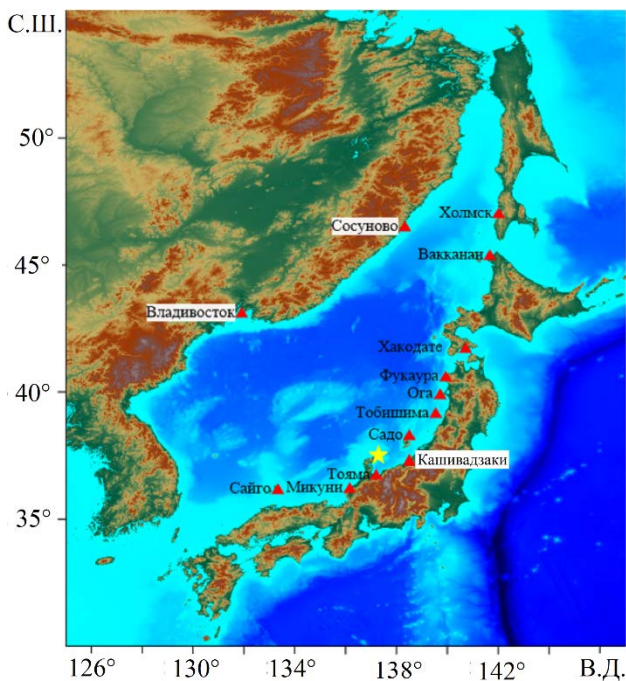
Считаем, что ось  $z$  направлена вертикально вверх;  $x, y$  – пространственные координаты;  $u(x, t), v(y, t)$  – горизонтальные компоненты скорости,  $\eta(x, y, t)$  – возмущение свободной поверхности относительно спокойного уровня;  $H$  – максимальная глубина бассейна; функция  $B(x, y, t)$  определяет изменение дна бассейна (учет характеристик динамического сейсмического очага). В начальный момент времени в области решения задаются параметры динамического сейсмического очага (координаты, скорость смещения блоков-клавиш). Считаем, что перед началом генерации вода, заполняющая область с начальной формой дна, покоится, т. е. скорость и возмущение свободной поверхности отсутствовали:

$$\eta(x, y, 0) = 0; u(x, 0) = 0; v(x, 0) = 0.$$

В последней мористой точке на глубине 5 м поставлено условие полного отражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальное и минимальное смещение волнового уровня. Расчетная область, применяемая для данных расчетов, составила  $125,01^\circ$ –  $147,00^\circ$  в. д.,  $30,01^\circ$ –  $55,00^\circ$  с. ш. с сеткой, которая имела шаг  $30' \approx 759$  м. При численном решении использовалась схема, построенная по аналогии со схемой Силески [3].

### Численное моделирование цунами в рамках клавишной модели сейсмического очага

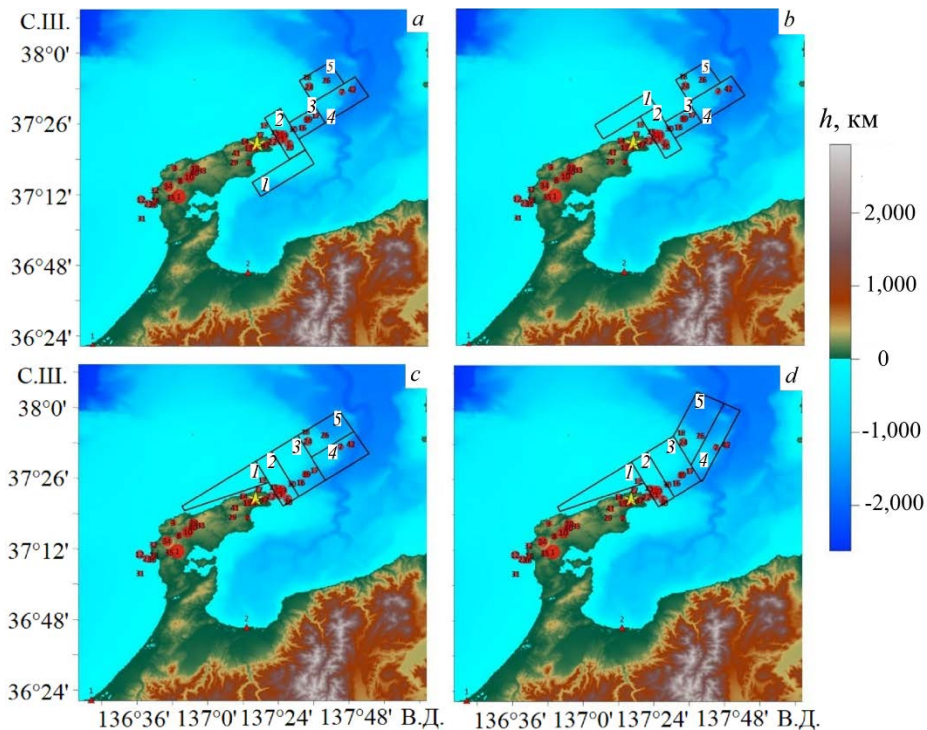
На рис. 3 представлена расчетная акватория с пунктами локализации мареографных станций [7].



**Р и с. 3.** Расчетная акватория (желтая звездочка – эпицентр землетрясения; красные треугольники – расположение мареографных станций [7])

**Fig. 3.** Calculated water area (yellow star is the earthquake epicenter; red triangles denote the location of tide-gauge stations [7])

В работе было рассмотрено четыре сценария с разной локализацией очага землетрясения (рис. 4). На рис. 4, *a* приведен сценарий 1 с блоком 2 в районе зал. Тояма (*Toyama bay*) к юго-востоку от п-ова Ното. На рис. 4, *b* такой же блок расположен в Японском море к северо-западу от п-ова Ното. Расположение остальных блоков в очаге землетрясения для этих сценариев аналогично. Для сценария 3 локализация очага изображена на рис. 4, *c*. Можно видеть, что блок, расположенный к северо-западу от полуострова, принял треугольную форму, вытянутую вдоль всего полуострова. Форма остальных блоков также изменилась. В сценарии 4 форма блоков 1–3 не изменилась, но изменилось направление расположения блоков 4 и 5. Такое изменение локализации, размеров и ориентации блоков связано со сравнением результатов моделирования с натурными данными и данными других авторов. Всего было проведено 14 вариантов моделирования, 4 из которых будут приведены в данной работе.



**Р и с. 4.** Сценарии моделирования при различной локализации сейсмического очага: 1 (*a*); 2 (*b*); 3 (*c*); 4 (*d*) (1 – 5 – номера блоков-клавиш)

**F i g. 4.** Simulation of the scenarios of the seismic source different locations: 1 (*a*); 2 (*b*); 3 (*c*); 4 (*d*) (1 – 5 are the key-block numbers)

В табл. 2 приведена кинематика движения блоков-клавиш в очаге землетрясения. Для всех сценариев очаг состоит из пяти блоков, совершающих последовательные движения через определенные интервалы времени. Анализ временной последовательности появления афтершоков позволяет создать оценочный вариант кинематики движения блоков-клавиш в сейсмическом очаге.

В сценарии 1 блоки совершают последовательные движения через одинаковые интервалы времени 30 с. В сценарии 2 блоки также совершают последовательные движения через одинаковые интервалы времени 30 с, но с отрицательными значениями смещения. В сценариях 3 и 4 разнонаправленные смещения блоков сохраняются. В сценарии 3 блоки совершают последовательные движения через разные интервалы времени в диапазоне 60–140 с. В сценарии 4 блоки совершают последовательные движения через разные интервалы времени от 60 до 130 с. Рисунок 5 иллюстрирует процесс генерации очага цунами в сценариях 1 и 4, что наглядно соответствует локализациям очага землетрясения, приведенным на рис. 4, *a* и *d*.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

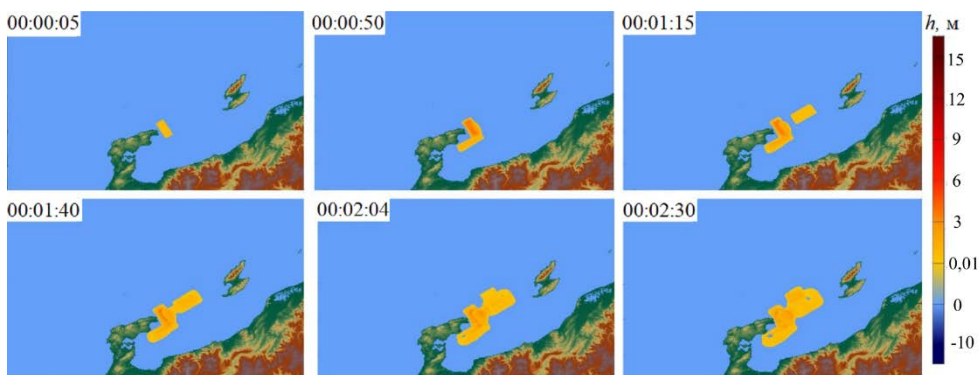
**Кинематика движения блоков в очаге землетрясения в четырех сценариях**  
**Kinematics of block motion in the earthquake source in four scenarios**

Параметр / Parameter	Номер блока / Block number				
	1	2	3	4	5
<i>Сценарий 1 / Scenario 1</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	1,5	3	1	1	1
Время начала движения, с / Start time of motion, s	30	0	90	60	120
Время конца движения, с / End time of motion, s	60	30	120	90	150
<i>Сценарий 2 / Scenario 2</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	2	1	–1	1	–1
Время начала движения, с / Start time of motion, s	0	30	90	60	120
Время конца движения, с / End time of motion, s	30	60	120	90	15
<i>Сценарий 3 / Scenario 3</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	3	1,4	–1,3	1,5	1,2
Время начала движения, с / Start time of motion, s	0	90	190	350	520
Время конца движения, с / End time of motion, s	30	120	220	380	550
<i>Сценарий 4 / Scenario 4</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	3,2	–1,1	–0,2	0,2	1,3
Время начала движения, с / Start time of motion, s	0	90	190	350	440
Время конца движения, с / End time of motion, s	30	120	220	380	470

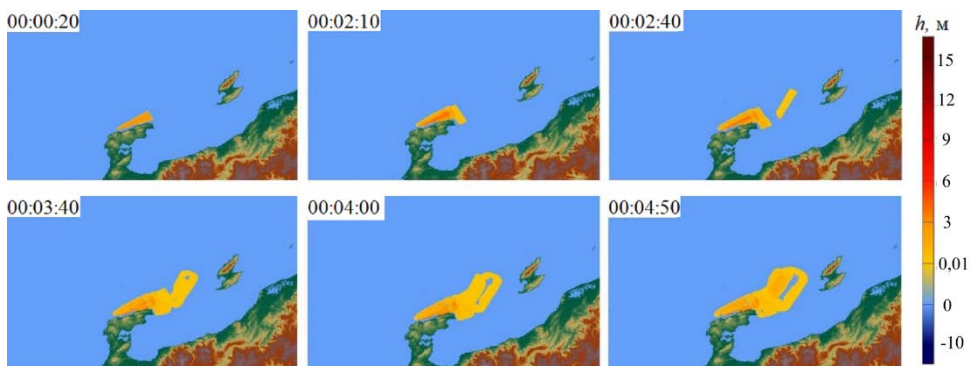
На рис. 5 видно, что смещение поверхности воды соответствует смещению блоков, представленному в табл. 2 для сценариев 1 и 4. Основное отличие связано с изменением локализации и формы блока 1 со сдвигом к юго-востоку (сценарий 1) или к северо-западу (сценарий 4) от п-ова Ното. Конфигурация блоков 2–5 различается не существенно.

На рис. 6 приведено положение волновых фронтов для девяти моментов времени. Хорошо видно, что спустя 10 мин после начала генерации волны высотой 1 м доходят до о. Садо, причем волны двигаются в эту сторону быстрее, чем в сторону залива, что связано с глубоководной впадиной Тояма. По истечении 30 мин волновой фронт достиг прибрежных городов Кашивазаки и Тояма. На 45-й минуте волновой фронт высотой 0,5 м достиг северной части о. Хонсю и огибает п-ов Ното. Спустя 1 ч 45 мин после землетрясения волны высотой ~ 20 см достигают г. Владивостока и южной части о. Хоккайдо. В 5:56:30 волновой фронт достиг г. Холмса, расположенного в северной части о. Сахалин.

По распределению высот на рис. 7 видно, что имеет место хорошее согласие с рис. 1, где наиболее опасной областью являются побережья, расположенные в северо-восточной части п-ова Ното, а также города Тояма, Садо и Кашивазаки. Расчет проводится до 5-метровой изобаты.



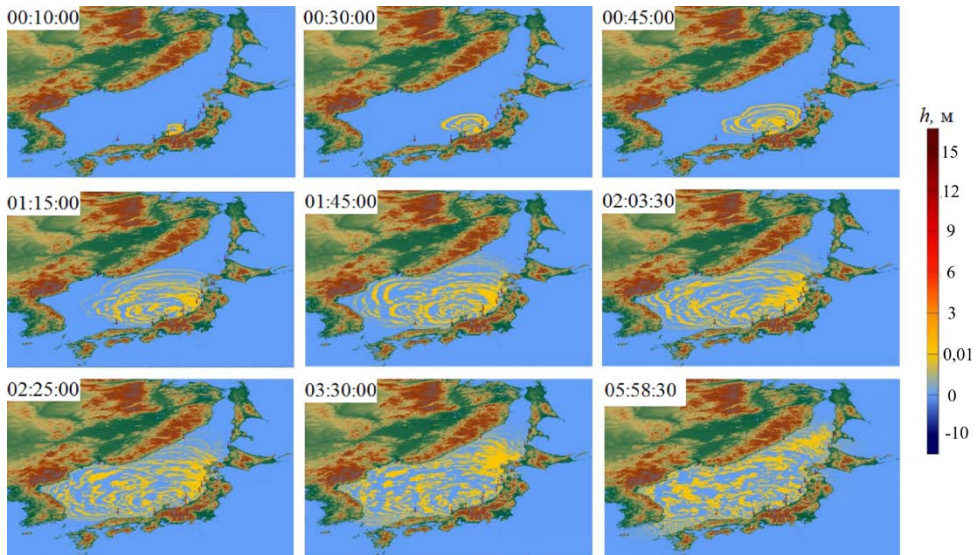
*a*



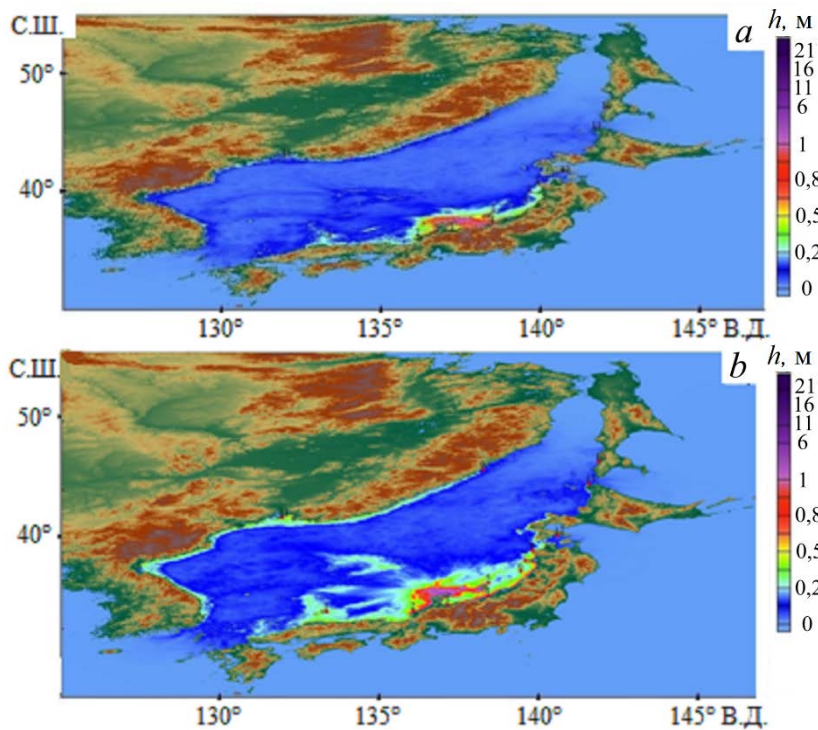
*b*

**Р и с. 5.** Генерация очага цунами в шесть моментов времени в сценариях 1 (*a*) и 4 (*b*)

**Fig. 5.** Generation of a tsunami source at six time points in scenarios 1 (*a*) and 4 (*b*)



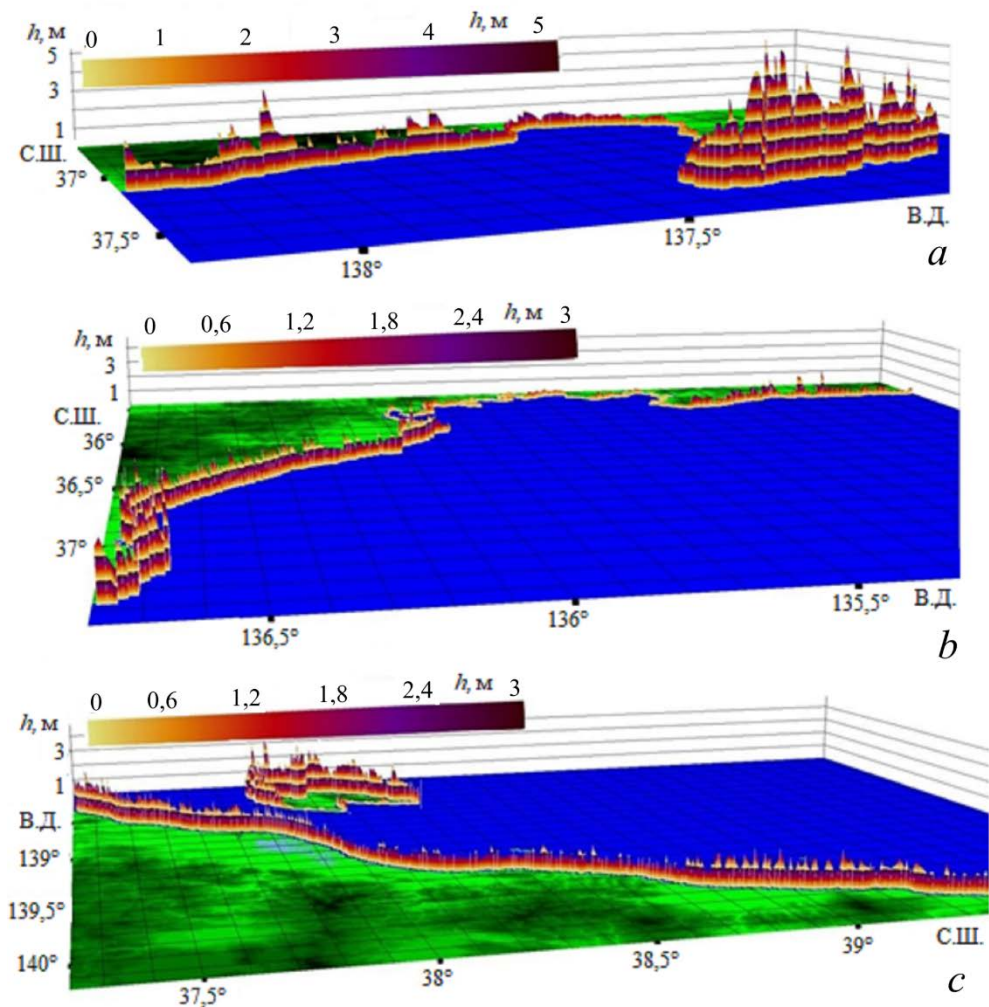
**Р и с. 6.** Распространение волн цунами по расчетной акватории в сценарии 4  
**Fig. 6.** Propagation of tsunami waves across the calculated water area in scenario 4



**Р и с. 7.** Распределение максимальных высот волн по расчетной акватории в сценариях 1 (a) и 4 (b)  
**Fig. 7.** Distribution of maximum wave heights across the calculated water area in scenarios 1 (a) and 4 (b)



С использованием данных расчета по сценарию 4 были построены 3D-гистограммы распределения высот в зал. Тояма, в районах Чюба, Тохоку, Кансай и о. Садо (рис. 8). Хорошо видно, что средняя высота пришедших волн в зал. Тояма равна 1 м, а на западной части п-ова Ното – 5 м.

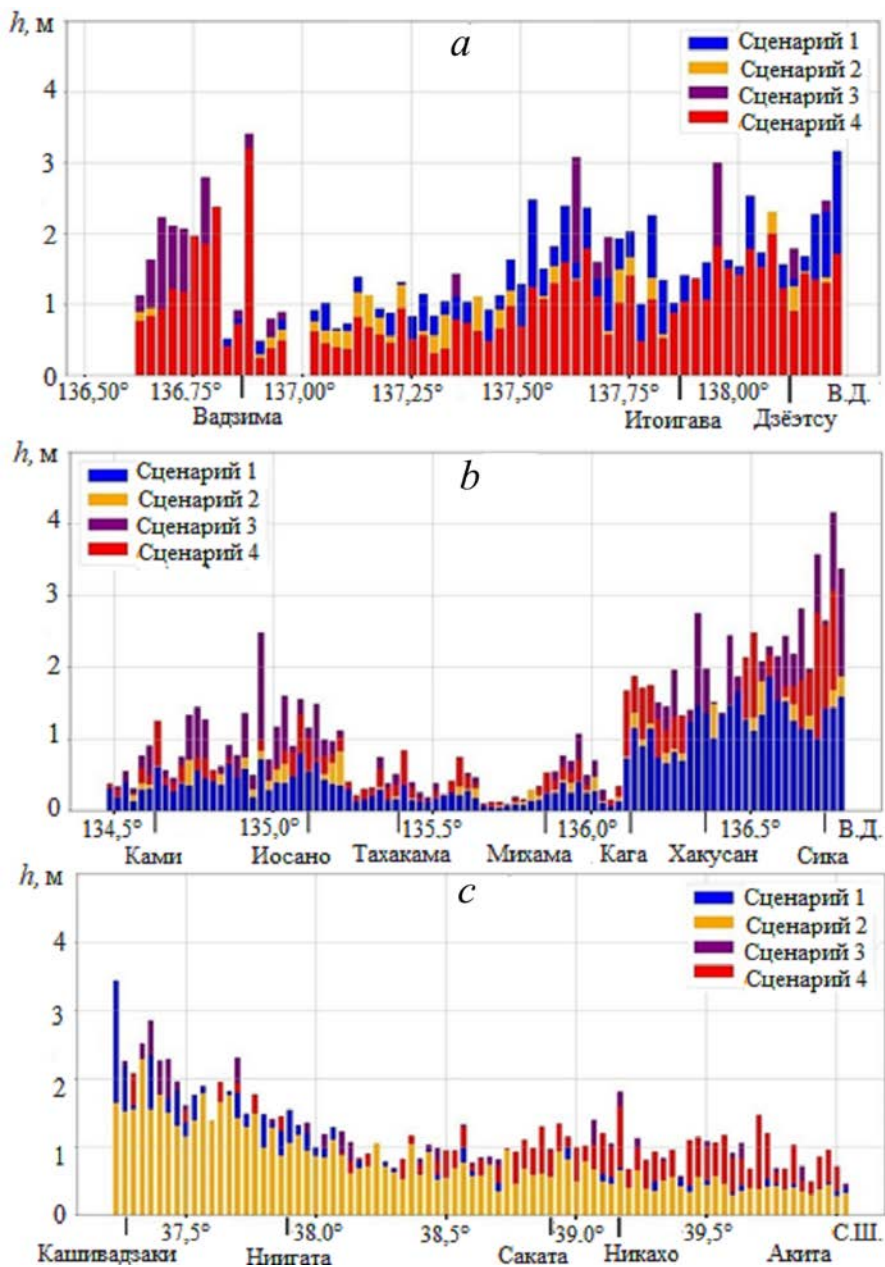


**Р и с. 8.** 3D-гистограммы высоты волн: *a* – зал. Тояма; *b* – район Чюба и Кансай; *c* – район Тохоку и о. Садо (синий цвет – море, зеленый – суша)  
**F i g. 8.** 3D histograms of wave heights: *a* – Toyama Bay; *b* – Chuba and Kansai area; *c* – Tohoku region and Sado Island (blue color denote sea, green color – land)

На рис. 8, *b* можно видеть, что высота волн в южной части п-ова Ното составила 3 м, а далее в районе Чюба средняя высота волн была 1 м. На рис. 8, *c* хорошо видно, что средняя высота волн, пришедших в северную часть района Тохоку, составила 1 м, однако высота волн на северной части о. Садо была в среднем 2,5 м.

**Анализ результатов численного моделирования цунами при землетрясении 01.01.2024 в Японии**

На рис. 9 приведены 2D-гистограммы высоты волн цунами для различных участков расчетных побережий в четырех рассматриваемых сценариях.



**Р и с. 9.** 2D-гистограммы высот волн: *a* – зал. Тояма; *b* – район Чюба и Кансай; *c* – район Тохоку и о. Садо

**F i g. 9.** 2D histograms of wave heights: *a* – Toyama Bay; *b* – Chuba and Kansai area; *c* – Tohoku region and Sado Island

На рис. 9, *a* хорошо видно, что в районе пос. Вадзима высота волн в 3-м и 4-м сценариях составляет 3 м, в пунктах Итоигава и Дзээтсу высота волн в 4-м сценарии – не более метра, а в 1, 2, 3-м сценарии она составляет 1–1,5 м. На рис. 9, *c* можно заметить, что высоты волн в сценарии 1 на побережьях районов Чюба и Кансай в среднем на 0,5 м меньше, чем в сценариях 3, 4. Это обусловлено тем, что первый блок в первом сценарии располагается внутри залива Тояма, а в остальных сценариях первый блок расположен в противоположной части п-ова Ното. На рис. 9, *c* видно, что высота волн в сценарии 1 больше, чем в остальных сценариях, вблизи зал. Тояма (до 38° с. ш.), а севернее залива преобладают высоты волн из 4-го сценария. Это также обусловлено расположением блоков, поскольку волны с наибольшими высотами из 1-го сценария распространяются из зал. Тояма, а волны из сценариев 2, 3, 4 огибают о. Садо и достигают северной части о. Хонсю с большими амплитудами. В табл. 3 приведены данные по всем проведенным сценариям (сценарии 1–4) и натурные данные с мареографных станций <sup>5</sup>.

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Максимальный подъем (см) уровня моря вблизи населенных пунктов, расположенных на побережьях расчетной акватории**  
**Sea level maximum rise (cm) near the settlements located on the estimated water area coast**

Пункт / Settlement	Натурные данные <sup>5</sup> / Field data <sup>5</sup>	Сценарий / Scenario			
		1	2	3	4
Saigo	27,1	34,2	24,0	20,1	21,9
Mikuni	31,5	68,7	45,1	28,6	30,2
Toyama	79,4	124,8	81,8	78,6	85,0
Kashiwazaki	40,2	121,3	71,2	53,5	65,4
Sado	32,0	37,2	20,1	31,4	24,6
Oga	27,4	62,3	26,0	31,2	31,4
Fukauro	33,9	25,2	10,0	23,4	28,5
Vladivostok	28,0	34,0	18,4	29,5	27,8
Hakodate	9,9	2,6	1,5	3,9	3,3
Wakkanai	8,5	2,8	1,8	5,7	7,5
Sosunovo	11,4	7,1	3,5	7,6	10,7
Kholmsk	12,0	1,2	1,0	3,5	4,1

**Обсуждение результатов**

Целью данной работы было получение волновых характеристик в акватории Японского моря на основе моделирования, для чего были рассмотрены 14 сценариев, из которых в данной работе приведены 4 с наилучшими волновыми характеристиками процесса. В ходе исследования были проанализированы

имеющиеся публикации по данному землетрясению [6–9]. Сравнение полученных нами результатов с данными из этих публикаций, наиболее детально – с данными работ [6, 7] (табл. 4), выполненных для модельных очагов землетрясения, локализация которых близка к предложенной в нашей работе, показывает, что данные нашего численного моделирования в основном близки, с точностью до погрешности в 5–6 см, к мареографным данным на соответствующих станциях. Там же, где есть существенное различие между амплитудой цунами и расчетной высотой, оно может быть объяснено сложными физическими процессами в заливе Тояма, такими как переотражение, краевые волны, резонансные явления в заливе [6–9].

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

**Максимальный подъем уровня моря вблизи населенных пунктов, расположенных на побережьях расчетной акватории, в разных источниках**  
**Sea level maximum rise (cm) near the settlements located on the estimated water area coast (data from different sources)**

Пункт / Settlement	Натурные данные [7] / Field data [7]	Сценарий 4 / Scenario 4	Данные работы [6] / Data from [6]
Saigo	27,1	21,9	22
Mikuni	31,5	30,2	40
Toyama	79,4	85,0	75
Kashiwazaki	40,2	65,4	60
Sado	32,0	24,6	10
Oga	27,4	31,4	18
Fukaura	33,9	28,5	19
Vladivastok	28,0	27,8	5
Hakodate	9,9	3,3	–
Wakkanai	8,5	7,5	6
Sosunovo	11,4	10,7	3
Kholmsk	12,0	4,1	3

Так, например, на ст. Касивазаки все модели, как наши, так и используемые в работах [6, 7], переоценивают амплитуду цунами (от 89,4 до 227,1 см). По нашим расчетам, при изменении локализации и динамики очага землетрясения разброс в данном пункте составил от 53,5 до 121,3 см. Однако сценарий 4, выбранный нами как наиболее адекватный, в этом пункте дал расчетное значение 65,4 см, что также превысило наблюдаемую максимальную амплитуду в данном пункте.

В районе ст. Тояма максимальная амплитуда, по данным наблюдений, составила 79,4 см, а по сценарию 4 мы получили максимальное смещение волны 85,0 см, т. е. разница в 5,6 см. В работе [7] максимальная амплитуда, по данным моделирования, для данного пункта составила 79,4 см, а в работе [6] – 75 см.

То есть разница между расчетными и натурными данными в работах [6, 7] составила 4,4 и 4,2 см соответственно, т. е. на 1,2 и 1,4 см меньше, чем соответствующие наши данные. И хотя различия как в расчетах из работ [6, 7], так и в наших находятся, на наш взгляд, в рамках ошибки моделирования источника, в работе [6] сделано предположение, что такое различие возможно при существовании дополнительного к сейсмическому оползневого источника, это подтверждается результатами моделирования, проведенного авторами работы. Данные в остальных пунктах, за исключением Вакканай и Холмска, в нашем расчете имеют достаточно близкие к наблюдаемым амплитудам значения. Так, например, максимальная амплитуда волны во Владивостоке 28 см, а расчетные значения – 27,8 см. В пос. Сосуново эти значения составляют 11,4 и 10,7 см соответственно, а их разница 0,7 см.

### Заключение

Приведенные в данной работе расчеты с использованием блочно-клавишной модели землетрясения показали, что для землетрясения, произошедшего в Японском море 01.01.2024 г., особенно важным является учет геоморфологии морского дна и геодинамики тектонических процессов. Данная модель позволяет учитывать начальное распределение напряжений в зоне подготовки землетрясения, а также динамический переходной процесс формирования распределения смещений морского дна. Были рассмотрены очаги землетрясения различной локализации с различной формой составляющих его блоков. Наиболее удачной для моделирования внутриплитового активного разлома оказалась форма очага с длинным треугольным блоком на северо-западе о. Нота. Результаты численного моделирования показали, что с помощью клавишной модели землетрясения возможно адекватно моделировать даже такие сложные очаги землетрясения, как произошедшее на северо-западе о. Нота. Сравнение полученных нами данных расчетов с амплитудой максимальной высоты волны цунами с мареографных станций, за исключением трех пунктов, дало погрешность меньше 6 см.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Holzer T. L.* The 1995 Hanshin-Awaj (Kobe), Japan, Earthquake // *GSA Today: A publication of the Geological Society of America.* 1995. Vol. 5, no. 8. P. 154–167. URL: <https://rock.geosociety.org/gsatoday/archive/5/8/pdf/i1052-5173-5-8-sci.pdf> (дата обращения: 28.09.2024).
2. Comparative numerical simulation of the Tohoku 2011 tsunami / N. A. Baranova [et al.] // *Science of Tsunami Hazards.* 2015. Vol. 34, iss. 4. P. 212–230.
3. Modeling features of both the rupture process and the local tsunami wave field from the 2011 Tohoku Earthquake / L. Lobkovsky [et al.] // *Pure and Applied Geophysics.* 2017. Vol. 174. P. 3919–3938. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1539-5>
4. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries / M. Simons [et al.] // *Science.* 2011. Vol. 332, iss. 6036. P. 1421–1425. <https://doi.org/10.1126/science.1206731>
5. *Лобковский Л. И., Баранов Б. В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // *Доклады АН СССР.* 1984. Т. 275, № 4. С. 843–847.

6. Modeling the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami: implications for tsunami sources in the eastern margin of the Japan Sea / H. Masuda [et al.] // *Geoscience Letters*. 2024. Vol. 11. 29. <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00344-8>
7. *Fujii Y., Satake K.* Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (M<sub>JMA</sub> 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data // *Earth, Planets and Space*. 2024. Vol. 76. 44. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01991-z>
8. Dataset of post-event survey of the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami in Japan / M. Yuhi [et al.] // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11. 786. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03619-z>
9. Potential for tsunami detection via CCTV cameras in northeastern Toyama Prefecture, Japan, following the 2024 Noto Peninsula earthquake / T. Shirai [et al.] // *Geoscience Letters*. 2024. Vol. 11. 28. <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00343-9>
10. *Wells D. L., Coppersmith K. J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84, no. 4. P. 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
11. *Sielecki A., Wurtele M.* The numerical integration of the nonlinear shallow-water equations with sloping boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1970. Vol. 6, iss. 2. P. 219–236. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(70\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(70)90022-7)

*Об авторах:*

**Мазова Раиса Хаимовна**, профессор кафедры «Прикладная математика», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0003-2443-149X**, **Scopus Author ID: 6506297372**, [raissamazova@yandex.ru](mailto:raissamazova@yandex.ru)

**Мартыненко Александр Анатольевич**, магистрант, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Центральный университет» (123056, Россия, г. Москва, ул. Гашека, д. 7, стр. 1), [martynenko.busy@gmail.com](mailto:martynenko.busy@gmail.com)

**Куркин Андрей Александрович**, проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН.», доктор физико-математических наук, профессор РАН, **SPIN-код: 1390-3940**, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, **Scopus Author ID: 7003446660**, **ResearcherID: A-1972-2014**, [aakurkin@gmail.com](mailto:aakurkin@gmail.com)

## Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при различных схемах расчета адвективного переноса тепла и соли

О. А. Дымова

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
✉ [olgdyмова@mhi-ras.ru](mailto:olgdyмова@mhi-ras.ru)

Поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024;  
принята к публикации 17.07.2024.

### *Аннотация*

*Цель.* Проанализирована доступная потенциальная энергия и составляющие ее бюджета в Черном море по результатам численного моделирования циркуляции при использовании новой схемы аппроксимации температуры и солёности в операторе адвективного переноса.

*Методы и результаты.* На основе версий модели МГИ, различавшихся схемами аппроксимации адвективных членов, проведено два численных эксперимента. Разница между схемами состоит в том, что в эксперименте 1 выполнялось условие сохранения температуры и солёности в первой и второй степени, в эксперименте 2 – температуры в первой и третьей, солёности в первой и пятой степени. Получено, что при использовании новой схемы запас доступной потенциальной энергии увеличивается в среднем за год на 30 %. Разница обусловлена уменьшением горизонтальной диффузии в тёплый сезон года и уменьшением расхода доступной потенциальной энергии за счёт работы силы плавучести в холодный сезон. Валидация результатов моделирования по данным измерений температуры и солёности из Банка океанографических данных МГИ показала, что применение новой схемы аппроксимации позволяет уточнить поле плотности и энергетические характеристики в верхнем слое Черного моря. Ниже горизонта 300 м при незначительных расхождениях между модельными и натурными термохалинными характеристиками в двух расчетах выявлены качественные и количественные различия в энергетических полях: увеличивается разница в значениях доступной потенциальной энергии в центральной части и на периферии бассейна, возрастает площадь зон экстремальных значений работы силы плавучести.

*Выводы.* Использование новой схемы аппроксимации температуры и солёности в операторе адвективного переноса позволяет уточнить поле плотности и, как следствие, получить более точные оценки доступной потенциальной энергии циркуляции. В верхнем слое Черного моря (слой постоянного пикноклина и выше) разница между полями энергетических характеристик, рассчитанных в двух экспериментах, обусловлена различиями в пространственном распределении аномалий плотности, при этом абсолютные значения аномалий и максимальные значения энергии в экспериментах близки по величинам. Ниже слоя пикноклина доступная потенциальная энергия увеличивается при использовании новой схемы вследствие того, что изменения температуры и солёности приводят к увеличению нормальных к берегу градиентов аномалий плотности.

**Ключевые слова:** Черное море, моделирование, циркуляция, доступная потенциальная энергия, сила плавучести, аномалия плотности, термохалинные характеристики

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0001.

**Для цитирования:** Дымова О. А. Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при различных схемах расчета адвективного переноса тепла и соли // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 723–737. EDN WLDWWP.

© Дымова О. А., 2024

# Estimates of Available Potential Energy Budget in the Black Sea Using Different Schemes for Calculating Heat and Salt Advective Transport

O. A. Dymova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ [olgadymova@mhi-ras.ru](mailto:olgadymova@mhi-ras.ru)

## Abstract

**Purpose.** The study is purposed at analyzing the available potential energy and its budget components in the Black Sea based on the results of numerical circulation modeling using a new temperature and salinity approximation scheme in the advective transport operator.

**Methods and Results.** Two numerical experiments were carried out based on the MHI model versions differing from each other in their approximation schemes of advective terms. The difference between the schemes is that in experiment 1, the condition of conserving temperature and salinity in the first and second degrees is satisfied, whereas in experiment 2 – temperature in the first and third degrees, and salinity in the first and fifth degrees are conserved. It is found that application of the new scheme is accompanied by an increase in the available potential energy reserve by on average 30 % over a year. The difference is conditioned by a decrease in both the horizontal diffusion in a warm season and the consumption of available potential energy through the buoyancy work in a cold season. The modeling results validated by the temperature and salinity measurement data from the MHI Oceanographic Data Bank show that application of the new approximation scheme permits to specify the density field and the energy characteristics in the Black Sea upper layer. Below the 300 m horizon, the discrepancies between the model and *in-situ* thermohaline fields in two experiments are minor, whereas the qualitative and quantitative distinctions in energy fields are significant: difference in the values of available potential energy in the basin central and periphery parts as well as the area of zones with the extreme buoyancy work values increase.

**Conclusions.** Application of the new approximation scheme of temperature and salinity in the advective transport operator makes it possible to specify the field density and, as a consequence, to obtain more accurate estimates of the available potential energy of sea circulation. In the Black Sea upper layer (the main pycnocline layer and above), the difference between the fields of energy characteristics calculated in two experiments is due to the differences in spatial distribution of density anomalies, at that the anomaly absolute values and the maximum energy values in the experiments are close in their magnitudes. Below the pycnocline layer, application of the new scheme is followed by the growth of available potential energy since the temperature and salinity changes lead to an increase in the gradients of density anomalies normal to the coast.

**Keywords:** Black Sea, modeling, circulation, available potential energy, buoyancy work, density anomaly, thermohaline characteristics

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on theme no. FNNN-2024-0001.

**For citation:** Dymova, O.A., 2024. Estimates of Available Potential Energy Budget in the Black Sea Using Different Schemes for Calculating Heat and Salt Advective Transport. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 679-693.

## Введение

Мезомасштабные вихревые движения в океанах и морях являются одним из основных механизмов вертикального и горизонтального перераспределения вещества и энергии в морских бассейнах. Согласно классическим представлениям [1, 2], формирование таких вихрей связано с высвобождением некоторой



части потенциальной энергии океана, называемой доступной потенциальной (ДПЭ), и преобразованием ее в вихревую кинетическую энергию. Исследование бюджета ДПЭ позволяет оценить роль основных физических сил в мезомасштабной динамике моря. Основываясь на оценках потоков энергии, авторы [3] показали, что для глобального океана бароклинная продукция, обусловленная переносом аномалий плотности течениями, и потенциально-кинетическая конверсия, определяемая вертикальным вихревым потоком силы плавучести, являются основными механизмами преобразования ДПЭ. В работе [4] представлены результаты исследования глобальной вихревой ДПЭ и в дополнение к [3] указано, что в верхнем перемешанном слое океана существенную роль в бюджете ДПЭ играют диабатическое перемешивание, взаимодействие с атмосферой на границе вода – воздух и внутренняя диффузия. В литературе представлены также региональные особенности распределения и эволюции ДПЭ в крупномасштабных океанических течениях. Так, например, в [5] выполнены оценки скорости бароклинной конверсии ДПЭ и получено, что так как она на порядок больше скорости баротропной конверсии вихревой кинетической энергии, именно этот фактор объясняет бароклинный характер неустойчивости Гольфстрима. В [6] показано, что не ветровое воздействие, а вариации ДПЭ в результате теплового взаимодействия океана и атмосферы играют определяющую роль в бюджете вихревой кинетической энергии в районе течения Куроисио.

В современных условиях численное моделирование является одним из основных инструментов диагноза и прогноза гидродинамических и энергетических характеристик циркуляции. Традиционно уравнения скорости изменения энергии выводятся из дифференциальных уравнений энергетике океана [3, 7], однако их дискретные аналоги, не являющиеся точным следствием конечно-разностных уравнений модели океана, будут вносить ошибку в количественные оценки потоков энергии. Кроме того, для правильной оценки ДПЭ при переходе от разностного уравнения адвекции – диффузии плотности к уравнению скорости изменения энергии необходимо корректно аппроксимировать плотность в тех точках разностного шаблона, в которых она не рассчитывается напрямую. Учитывая высказанные соображения, в работе [8] предложена схема аппроксимации уравнения скорости изменения ДПЭ, которая получена в результате строгого алгебраического преобразования конечно-разностных уравнений модели. В [9] описана новая схема аппроксимации температуры и солёности на гранях бокса (для конечно-разностного шаблона, где температура и солёность рассчитываются в центре бокса), которая при произвольной полиномиальной зависимости плотности от температуры и солёности обеспечивает дивергентный вид уравнения адвекции плотности.

Данная статья представляет собой расширенную версию материалов доклада, представленного на 14-й международной конференции «Волны и вихри в сложных средах» в 2023 г. [10], и является продолжением численного анализа энергетике Черного моря [11]. Чтобы оценить, как влияет схема расчета термохалинных характеристик на пространственную и временную изменчивость энергетических потоков, формирующих ДПЭ, в настоящей работе на основе

аппроксимаций, предложенных в [8, 9], проведено моделирование циркуляции, рассчитаны и проанализированы все слагаемые уравнения бюджета ДПЭ, проведено сопоставление с полученными ранее данными.

### Методика расчета и используемые данные

Анализ особенностей распределения ДПЭ в Черном море проведен на примере моделирования циркуляции в 2016 г. Численные эксперименты выполнены при помощи вихререзающей модели Морского гидрофизического института с разрешением 1,6 км [11]. Модель построена на основе полной системы уравнений термогидродинамики океана в приближении Буссинеска и гидростатики. Уравнение состояния представлено нелинейной зависимостью плотности от температуры и солёности. Вертикальное турбулентное перемешивание параметризовано моделью замыкания Меллора – Ямады 2.5 [12], горизонтальная диффузия в уравнениях тепла и соли, а также горизонтальная вязкость в уравнениях движения описываются оператором Лапласа во второй степени с постоянными коэффициентами соответствующей размерности. В качестве граничных условий на свободной поверхности задаются напряжение ветра, потоки тепла, осадки и испарение по данным реанализа ERA5<sup>1</sup>. На твердых боковых участках границы для компонент скорости ставятся условия равенства нулю нормальной скорости и производной по нормали касательной скорости, а также равенства нулю их лапласианов, для температуры и солёности задано равенство нулю производных по нормали и их лапласианов. На дне ставится условие прилипания и условие отсутствия нормальных потоков тепла и соли. В модели учитываются климатический сток рек и водообмен через проливы [13], на жидких участках границы ставятся условия Дирихле. Коррекция неточностей задания потока тепла из атмосферы на поверхности моря проводится путем усвоения спутниковой температуры поверхности моря [14]. Батиметрия бассейна построена на основе цифрового массива глубин EMODnet<sup>2</sup>. Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполнена на сетке C [15]. Полная физическая постановка задачи, используемые коэффициенты и параметризации подробно представлены в [11].

В работе проведено два численных эксперимента по реконструкции циркуляции и точному расчету бюджета ДПЭ. Разница между ними состоит в способе вычисления температуры  $T$  и солёности  $S$  в конечно-разностном операторе адвективного переноса, который, например, для температуры имеет вид (для солёности аналогично):

$$ADV^T = [u_{i+1/2,j,k}(T_{i+1/2,j,k} - T_{i,j,k}) - u_{i-1/2,j,k}(T_{i-1/2,j,k} - T_{i,j,k})]h_x^{-1} + \\ + [v_{i,j+1/2,k}(T_{i,j+1/2,k} - T_{i,j,k}) - v_{i,j-1/2,k}(T_{i,j-1/2,k} - T_{i,j,k})]h_y^{-1} + \\ + [w_{i,j,k+1/2}(T_{i,j,k+1/2} - T_{i,j,k}) - w_{i,j,k-1/2}(T_{i,j,k-1/2} - T_{i,j,k})](h_z^k)^{-1},$$

где  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости течения;  $h$  – величина шага по пространству в соответствующем направлении;  $i, j, k$  – координаты узлов сетки

<sup>1</sup> ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present : data set / H. Hersbach [et al.] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. (date of access: 25.06.2023). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

<sup>2</sup> URL: <https://doi.org/10.12770/ff3aff8a-cff1-44a3-a2c8-1910bf109f85> (дата обращения: 27.08.2024).

модели в пространстве сеточных функций, соответствующие середине бокса на сетке  $C$  [15]. Так как на сетке  $C$  температура, соленость и плотность рассчитываются в центре модельного бокса, то их величины на гранях бокса (полуцелые индексы), строго говоря, неизвестны. В [9] показано, что в условиях адиабатичности и отсутствия внешних источников при нелинейном уравнении состояния, не зависящем от давления, для сохранения дискретного интеграла от плотности целесообразно использовать такие аппроксимации нелинейных слагаемых на гранях бокса, чтобы наряду с  $T$  и  $S$  сохранялись  $T^m$  и  $S^l$ , где  $m$  и  $l$  – целые положительные числа больше 2. В эксперименте 1 для вычисления  $T$  и  $S$  на гранях бокса использовалась формула

$$T_{i+1/2,j,k} = \frac{T_{i+1,j,k} + T_{i,j,k}}{2}, \quad S_{i+1/2,j,k} = \frac{S_{i+1,j,k} + S_{i,j,k}}{2}, \quad (1)$$

в эксперименте 2 – формула, подробный вывод которой показан в [9]:

$$S_{i+1/2,j,k} = \frac{4 S_{i+1,j,k}^4 + S_{i+1,j,k}^3 S_{i,j,k} + S_{i+1,j,k}^2 S_{i,j,k}^2 + S_{i+1,j,k} S_{i,j,k}^3 + S_{i,j,k}^4}{5 S_{i+1,j,k}^3 + S_{i+1,j,k}^2 S_{i,j,k} + S_{i+1,j,k} S_{i,j,k}^2 + S_{i,j,k}^3}, \quad (2)$$

$$T_{i+1/2,j,k} = \frac{2 T_{i+1,j,k}^2 + T_{i+1,j,k} T_{i,j,k} + T_{i,j,k}^2}{3 T_{i+1,j,k} + T_{i,j,k}}.$$

Формулы (1) и (2) описывают изменение  $T$  и  $S$  по координате  $x$  (для  $y, z$  аналогично). Для обоих способов расчета конечно-разностный оператор адвективного переноса имеет второй порядок аппроксимации. Разница между экспериментами состоит в том, что в эксперименте (1) сохранялись  $T, S$  и  $T^2, S^2$ ; в эксперименте (2) –  $T, S$  и  $T^3, S^3$ . Аппроксимация (2) имеет ограничения при  $|T| \ll 1$  °C и/или  $|S| \ll 1$  ‰. Для условий Черного моря такая ситуация практически не имеет места, и в представленных расчетах она отсутствует.

Скорость изменения ДПЭ рассчитывалась по формуле

$$\frac{\partial APE_{i,j,k}}{\partial t} + \left\{ \delta_x \left( u_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) + \delta_y \left( v_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) + \delta_z \left( w_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) \right\} (\delta_z \rho_k^s)^{-1} =$$

$$= -g \overline{w_{i,j,k}}^z \rho_{i,j,k}^* + \omega_{i,j,k} + (D_H + D_V)_{i,j,k},$$

$$APE_{i,j,k} = a_{i,j,k}^{pe} (\delta_z \rho_k^s)^{-1}, \quad a_{i,j,k}^{pe} = g \frac{(\rho_{i,j,k}^*)^2}{2}, \quad (3)$$

где  $APE$  – плотность ДПЭ;  $\delta$  – конечно-разностный аналог оператора дифференцирования по соответствующей координате;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho^s$  – средняя по площади  $k$ -го слоя плотность морской воды;  $\rho^*$  – аномалия плотности, рассчитанная как разница между локальной и средней по слою плотностью;  $D_H, D_V$  – горизонтальная и вертикальная диффузионные компоненты бюджета ДПЭ;  $\omega$  – обозначение дополнительных разностных слагаемых, не имеющих аналога в дифференциальном уравнении и возникающих в результате строгого вывода формулы (3) из конечно-разностных уравнений модели. Отметим, что  $\omega$  включает слагаемые, учитывающие изменение аномалий плотности на гранях бокса и связанные с адвективным переносом, а  $D$  – дополнительные диффузионные члены. Вывод и полный вид слагаемых  $\omega, D_H,$

$D_T$  представлены в [8]. Для удобства интерпретации результатов экспериментов перепишем уравнение (3) в символическом виде:

$$\frac{\partial APE}{\partial t} = ADV + WRG + DIFH + DIFV,$$

где  $ADV$  – изменение ДПЭ за счет адвективного переноса,  $WRG$  – за счет работы силы плавучести,  $DIFH$  и  $DIFV$  – за счет горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно.

В результате проведения численных экспериментов на каждые сутки 2016 г. получены трехмерные поля температуры, солёности, плотности, скорости течений, аномалий плотности, поля ДПЭ и компонент ее бюджета. Валидация результатов моделирования термохалинных полей выполнена на основе данных, полученных из Банка океанографических данных МГИ [16]. Контактные измерения температуры и солёности выполнены буями-профилемерами *Argo*, а также в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г. В таблице представлены среднеквадратические отклонения (СКО) между модельными и натурными значениями температуры и солёности для всех имевшихся данных наблюдений. Как видно из таблицы, в эксперименте 2 СКО температуры в слое 30–100 м уменьшается на 25 %, а среднее СКО солёности для горизонтов от 0 до 100 м – на 21 %. Для глубоководных горизонтов ниже 300 м разница между СКО для двух экспериментов незначительна.

**СКО между модельными и натурными температурой и солёностью**  
**Root mean square deviation between the model and *in-situ* temperature and salinity**

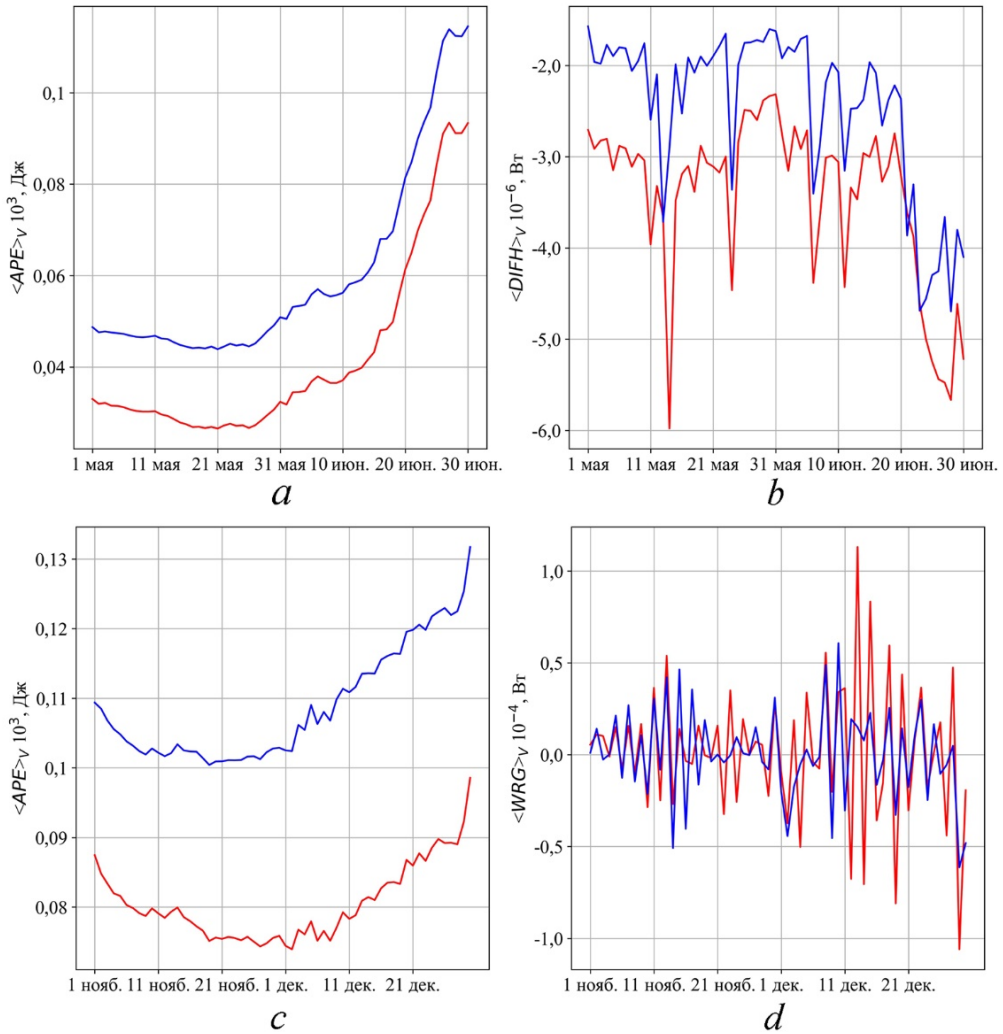
Глубина, м / Depth, m	Эксперимент 1 / Experiment 1		Эксперимент 2 / Experiment 2	
	Температура, °C / Temperature, °C	Солёность, ‰ / Salinity, ‰	Температура, °C / Temperature, °C	Солёность, ‰ / Salinity, ‰
0–5	0,79	0,28	0,94	0,22
5–30	1,53	0,23	1,54	0,17
30–100	1,12	0,67	0,84	0,56
100–300	0,26	0,48	0,27	0,50
300–800	0,05	0,09	0,07	0,10
800–1500	0,03	0,08	0,03	0,08

Сравнение результатов моделирования с натурными данными показало, что уменьшение СКО в верхнем 100-метровом слое Черного моря при использовании схемы аппроксимации (2) с точки зрения практической гидрологии проявляется в уменьшении толщины верхнего перемешанного слоя в зимний период и уменьшении глубины залегания верхней границы слоя скачка температуры летом в центральной части моря.

**Результаты**

По результатам численных экспериментов проведен анализ интегральных и пространственных распределений компонент бюджета ДПЭ и сопоставление

с распределением термохалинных и динамических характеристик циркуляции. Оба эксперимента стартовали с одинаковых начальных условий, а значимые различия в значениях модельных параметров проявились с апреля. Получено, что начиная с весны средняя по объему ДПЭ в эксперименте 2 превышает ее значения в эксперименте 1, эта разница составила в среднем за год около 30 %. Так как для Черного моря характерна сильная сезонная изменчивость гидрофизических полей [17], то для более детального сравнения мы рассмотрели летний (май – июнь) и зимний (ноябрь – декабрь) периоды.

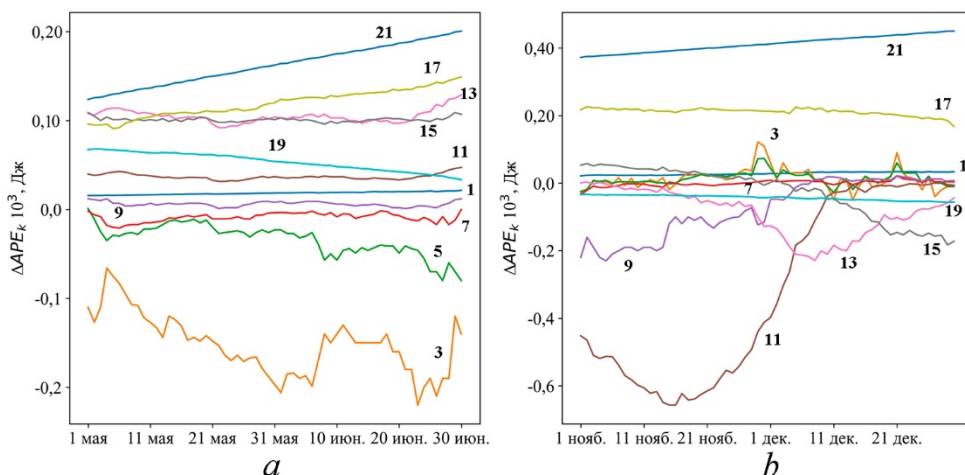


**Рис. 1.** Изменение со временем средних по объему ДПЭ (*a, c*), горизонтальной диффузии ДПЭ (*b*) и работы силы плавучести (*d*) для двух экспериментов в мае – июне (*a, b*) и ноябре – декабре (*c, d*) 2016 г. Красная кривая – эксперимент 1, синяя кривая – эксперимент 2

**Fig. 1.** Change over time of volume-average APE (*a, c*), horizontal diffusion of APE (*b*) and buoyancy work (*d*) for two experiments in May – June (*a, b*) and November – December (*c, d*), 2016. Red curves – experiment 1, blue curves – experiment 2

На рис. 1 представлено изменение со временем средних по объему  $APE$ ,  $WRG$  и  $DIFH$  для двух экспериментов летом и зимой 2016 г. Анализ изменения со временем компонент бюджета ДПЭ показал, что в летний сезон увеличение ДПЭ в эксперименте 2 (рис. 1, *a*) связано с уменьшением потерь энергии вследствие горизонтальной диффузии (рис. 1, *b*). При этом пространственное распределение компоненты  $DIFH$  указывает на ослабление горизонтальной диффузии в прибрежной зоне на северо-западном шельфе (СЗШ) и в глубоководной части моря [10, с. 379, рис. 1, *b*]. При анализе термохалинных характеристик на СЗШ в эксперименте 2 выявлено уменьшение горизонтальных градиентов солёности, что и определяет уменьшение потока энергии, обусловленного горизонтальной диффузией. В центральной части диффузионный поток уменьшается вследствие более однородного пространственного распределения поля плотности.

Согласно математической постановке задачи в модели МГИ положительное значение  $WRG$  соответствует преобразованию ДПЭ в кинетическую энергию, т. е. уменьшению ДПЭ. Для представленных на рис. 1, *d* кривых средние значения параметра  $\langle WRG \rangle_v$  равны  $0,15 \cdot 10^{-5}$  и  $0,01 \cdot 10^{-5}$  Вт для экспериментов 1 и 2 соответственно. Таким образом, зимой увеличение запаса ДПЭ в эксперименте 2 (рис. 1, *c*) обусловлено тем, что меньшее количество ДПЭ расходуется на трансформацию в кинетическую энергию. Кроме того, как показано в работе [10, с. 380, рис. 2], в западной и юго-западной частях материкового склона в эксперименте 2 усиливается поток энергии, вызванный трансформацией кинетической энергии в доступную потенциальную. Компонента  $WRG$  определяется плотностью и вертикальной скоростью. Следовательно, выхолаживание и интенсификация зимней конвекции являются основными причинами увеличения запаса ДПЭ зимой.



**Р и с. 2.** Изменение со временем разницы  $\Delta APE_k$  в мае – июне (*a*) и ноябре – декабре (*b*) 2016 г. Цифры – номер слоя (индекс  $k$ )

**F i g. 2.** Change over time of difference  $\Delta APE_k$  in May – June (*a*) and November – December (*b*), 2016. Numerals are the layer numbers (index  $k$ )

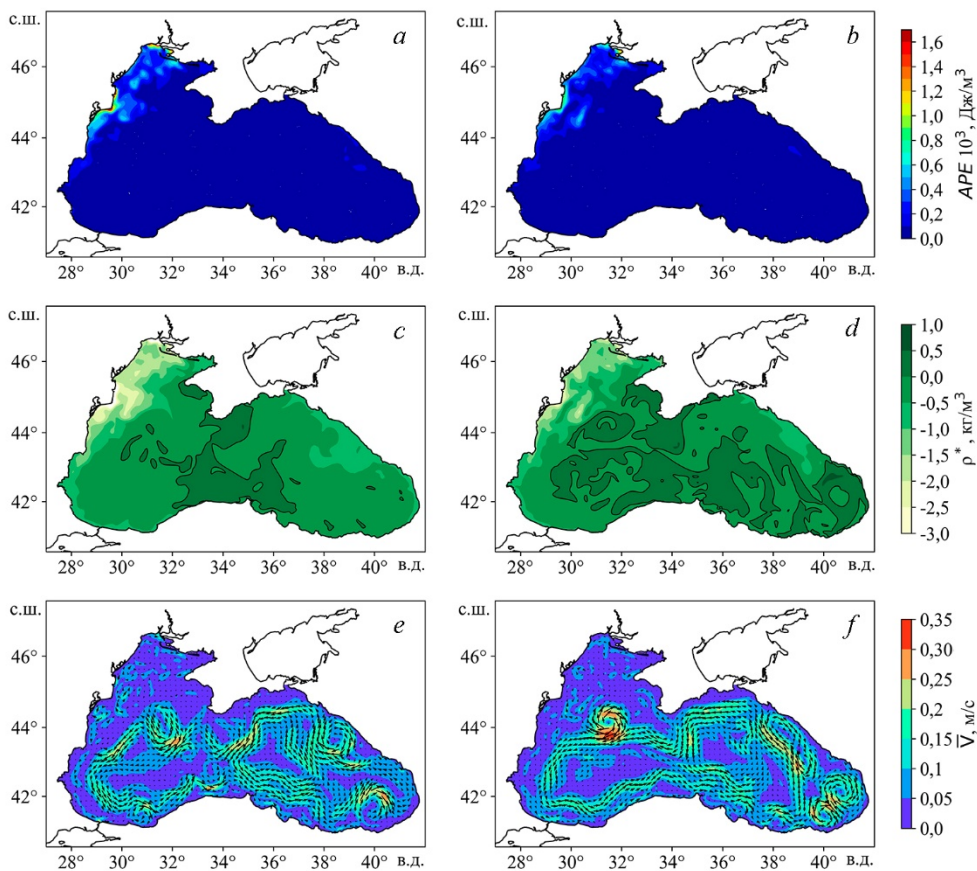
Сравнение кривых  $APE$  и  $DIFH$  в двух экспериментах, представленных на рис. 1, демонстрирует сходство временной изменчивости средних по объему величин энергетических характеристик. Такое поведение кривых, вероятно, связано с изменчивостью внешних условий. Ранее показано [18], что в запас ДПЭ в Черном море максимальный вклад дает верхний 30-метровый слой моря, наиболее сильно подверженный влиянию термохалинного форсинга. Так как граничные условия для обоих экспериментов одинаковы, то изменчивость со временем средних интегральных величин  $APE$  и  $DIFH$  практически идентична в экспериментах. Сдвиг кривых по оси ординат обусловлен увеличением средней аномалии плотности вследствие изменения термохалинных характеристик.

Для летнего и зимнего периодов оценено изменение запаса ДПЭ по глубине для двух экспериментов. Для этого в каждом модельном слое рассчитывалась разница между средней по объему  $k$ -го слоя ДПЭ в двух расчетах  $\Delta APE_k = \langle APE_{\text{exp2}} \rangle_{V_k} - \langle APE_{\text{exp1}} \rangle_{V_k}$ . Положительное значение  $\Delta APE_k$  указывает, что запас ДПЭ в  $k$ -ом слое выше в эксперименте 2. Получено, что летом в слое 5–40 м средняя ДПЭ выше в эксперименте 1 (рис. 2, *a*, кривые 3, 5, 7, 9). Начиная с горизонта 60 м (рис. 2, *a*, кривые 11 и выше), ДПЭ в эксперименте 2 превышает значения в эксперименте 1, достигая максимума на 21-м слое (рис. 2, *a*, кривая 21), соответствующем глубине 500–700 м.

Для зимнего сезона в слое 40–100 м величина  $\Delta APE_k$  отрицательна (рис. 2, *b*, кривые 9, 11, 13), следовательно ДПЭ в первом эксперименте выше, чем во втором. Для глубоководных горизонтов зимой, так же как и летом, запас ДПЭ в эксперименте 2 выше, чем в 1. Однако максимальная разница между расчетами зимой почти в два раза больше.

### Обсуждение

Начальные и граничные условия для численных экспериментов были одинаковыми, различались они только схемой расчета температуры и солёности в операторе адвективного переноса тепла и соли. Других изменений в конечно-разностные уравнения модели или величины модельных констант не вносилось. Все описанные выше различия между результатами расчетов прямо или опосредованно через изменение плотности обусловлены изменением адвекции температуры и солёности. Для определения физических причин выявленных различий, рассмотрим подробнее пространственные распределения энергетических и гидрологических характеристик циркуляции на различных горизонтах в летний и зимний периоды. Как показано выше, летом в верхнем слое моря запас ДПЭ больше в эксперименте 1. Анализ пространственного распределения плотности ДПЭ и аномалии локальной плотности морской воды в июне свидетельствует, что в верхнем слое  $APE$  меньше в эксперименте 2 (рис. 3, *b*) вследствие пониженных абсолютных значений аномалии плотности на СЗШ (рис. 3, *d*) по сравнению с экспериментом 1.

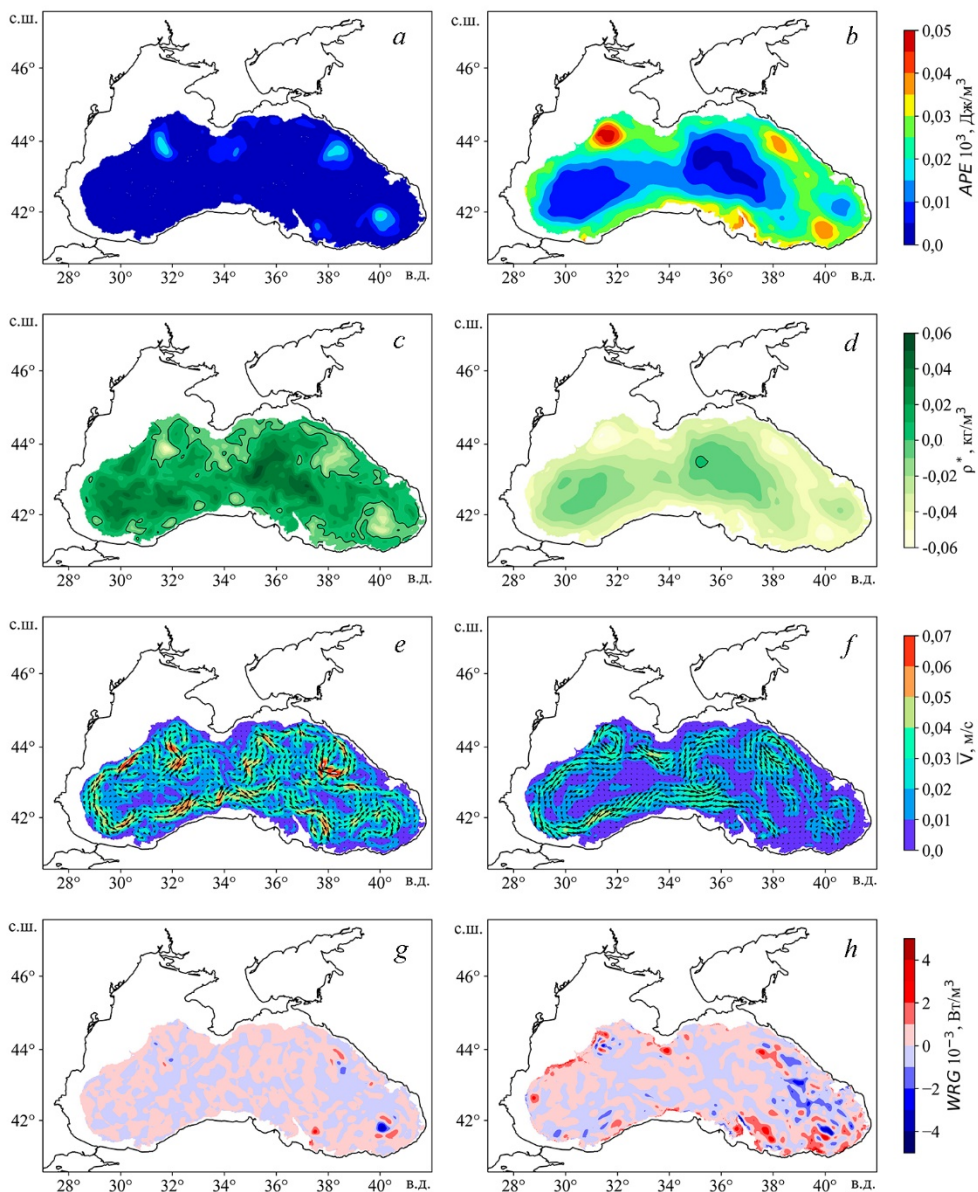


**Р и с. 3.** Пространственные распределения  $APE$  (*a, b*), аномалии плотности (*c, d*), скорости течений (*e, f*) на глубине 5 м по результатам экспериментов 1 (*a, c, e*) и 2 (*b, d, f*) на 15 июня 2016 г.  
**F i g. 3.** Spatial distributions of  $APE$  (*a, b*), density anomaly (*c, d*) and current velocities (*e, f*) at the 5 m depth based on the results of experiments 1 (*a, c, e*) and 2 (*b, d, f*) on June 15, 2016

Уменьшение модуля аномалии плотности обусловлено пониженными значениями температуры и повышенной соленостью по сравнению с экспериментом 1. Как видно из результатов валидации термохалинных характеристик (таблица), использование новой схемы аппроксимации (2) позволяет улучшить воспроизведение солености в верхнем 100-метровом слое. А так как в Черном море плотность в преобладающей степени зависит от солености [19], то можно предположить, что и аномалия плотности, используемая в формуле (3), рассчитана более корректно в эксперименте 2. Следовательно, оценки ДПЭ, полученные в эксперименте 2, более реалистичны.

При сравнении рис. 3, *c* и *d* наблюдается разница в площади областей положительных аномалий плотности в центральной части моря, которая мало влияет на пространственное распределение  $APE$ , однако проявляет сходство с полями скорости течений (рис. 3, *e* и *f*). Обширные положительные аномалии соответствуют более плотным водам внутри Основного Черноморского течения в эксперименте 2 летом, что свидетельствует о более интенсивной циклонической циркуляции (рис. 3, *f*) и подъеме глубинных вод в центральной части моря.





**Р и с. 4.** Пространственные распределения  $APE$  ( $a, b$ ), аномалии плотности ( $c, d$ ), скорости течений ( $e, f$ ), работы силы плавучести ( $g, h$ ) на глубине 500 м по результатам экспериментов 1 ( $a, c, e, g$ ) и 2 ( $b, d, f, h$ ) на 15 июня 2016 г.

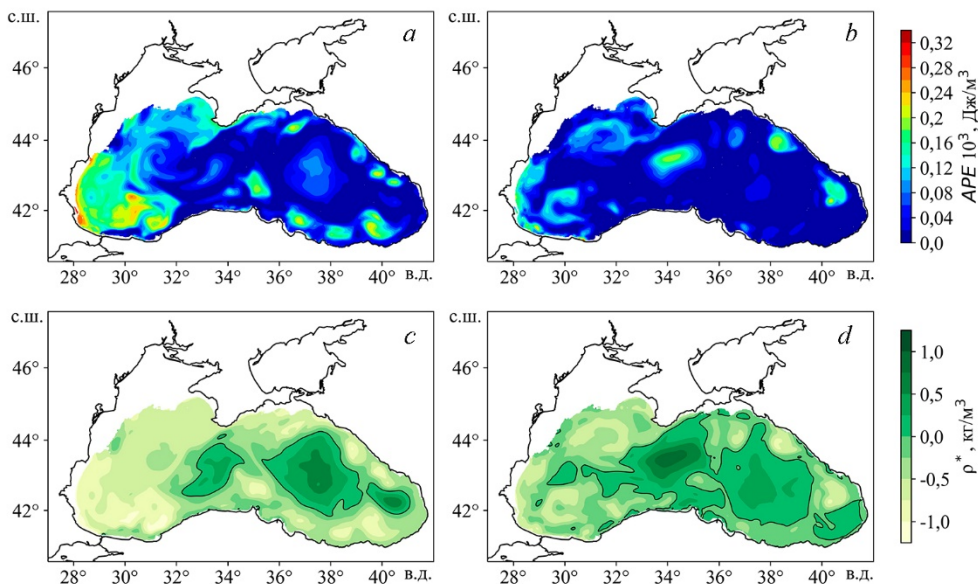
**Fig. 4.** Spatial distributions of  $APE$  ( $a, b$ ), density anomaly ( $c, d$ ), current velocities ( $e, f$ ) and buoyancy work ( $g, h$ ) at the 500 m depth based on the results of experiments 1 ( $a, c, e, g$ ) and 2 ( $b, d, f, h$ ) on June 15, 2016

На глубинных горизонтах летом (рис. 4,  $a, b$ ) различия в величине  $APE$  более значимы, чем в верхнем слое: во-первых, экстремумы  $APE$  в эксперименте 2 примерно в 2,5 раза больше, чем в эксперименте 1; во-вторых, наблюдается существенная разница в величине  $APE$  между периферией и центральной частью моря. Сопоставление с полями аномалии плотности показывает,

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024 733

что увеличение  $APE$  в эксперименте 2 обусловлено большими абсолютными значениями аномалии плотности на периферии бассейна (рис. 4,  $d$ ), тогда как в эксперименте 1 наибольшие значения расположены в центре (рис. 4,  $c$ ). Как показано в работе [18], такая структура полей  $APE$  и аномалии плотности на глубинных горизонтах определяется мезомасштабной вихревой изменчивостью. Как видно из рис. 4,  $e$  и  $f$  в эксперименте 2 антициклонические вихри вблизи материкового склона имеют более четкую структуру и их расположение совпадает с повышенными значениями  $APE$ . Кроме того, анализ компонент бюджета ДПЭ показал, что во втором эксперименте увеличивается вклад работы силы плавучести в зоне действия вихрей (рис. 4,  $h$ ).

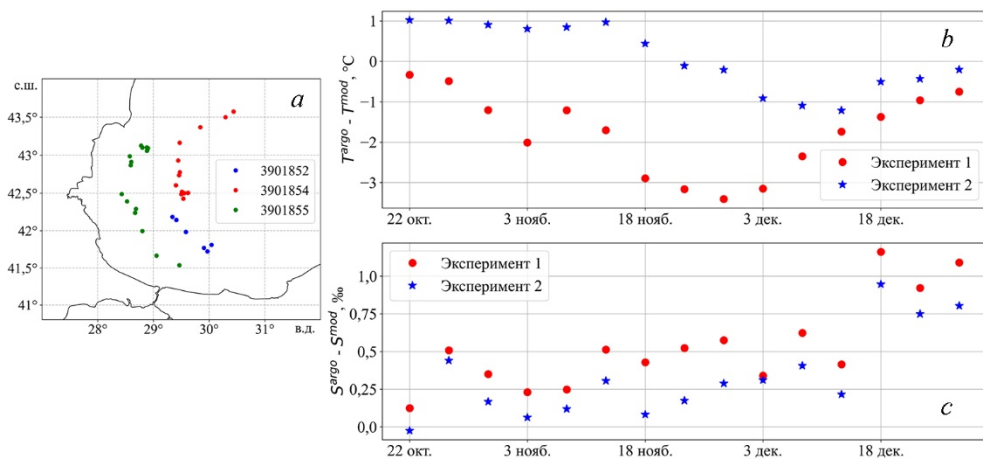
Для зимнего периода получено, что наибольшие различия между значениями ДПЭ в двух экспериментах наблюдаются в слое 40–100 м (рис. 2,  $b$ ). Чтобы выявить причины этих различий были проанализированы карты полей  $APE$  и аномалии плотности на горизонтах 50, 75 и 100 м. Как видно из рис. 5, в эксперименте 1 повышенные значения  $APE$  наблюдаются на периферии бассейна в западной части моря (рис. 5,  $a$ ) и эти области пространственно соответствуют отрицательным аномалиям плотности (рис. 5,  $c$ ) в антициклонических вихрях. Также видно, что пространственная структура полей аномалии плотности в эксперименте 2 (рис. 5,  $d$ ) существенно отличается от данных эксперимента 1 (рис. 5,  $c$ ).



**Рис. 5.** Пространственные распределения  $APE$  ( $a, b$ ), аномалии плотности ( $c, d$ ) на глубине 75 м по результатам экспериментов 1 ( $a, c$ ) и 2 ( $b, d$ ) на 15 декабря 2016 г.  
**Fig. 5.** Spatial distributions of  $APE$  ( $a, b$ ) and density anomaly ( $c, d$ ) at the 75 m depth based on the results of experiments 1 ( $a, c$ ) and 2 ( $b, d$ ) on December 15, 2016

Поэтому в зимний период дополнительно была проведена оценка изменения со временем отклонения температуры и солёности от данных измерений для юго-западной части моря на глубинах 50–100 м. Были рассмотрены три

буя-профилемера *Argo* № 3901852, 3901854, 3901855 (карта расположения станций профилирования показана на рис. 6, *a*). На рис. 6, *b* и *c* представлены величины отклонений модельных данных от измеренных на горизонте 75 м. Среднее за период 22.10.2016–28.12.2016 отклонение температуры составило  $-1,7$  и  $+0,1$  °C; отклонение солености 0,5 и 0,3 ‰ для экспериментов 1 и 2 соответственно. Как видно для указанных буев в эксперименте 2 отклонения термохалинных характеристик уменьшаются. Следовательно, данные восстановлены точнее, чем в эксперименте 1. Таким образом, для зимнего сезона 2016 г. оценки ДПЭ, полученные с использованием схем аппроксимации (2), (3), являются более адекватными реальной энергетике циркуляции.



**Р и с. 6.** Карта расположения станций профилирования буев *Argo* (*a*), отклонение модельной температуры (*b*) и солености (*c*) от данных наблюдений на глубине 75 м в октябре – декабре 2016 г.  
**F i g. 6.** Map of the locations of *Argo* profiling float stations (*a*), deviations of model temperature (*b*) and salinity (*c*) from the observation data at the 75 m depth in October – December, 2016

Для глубинных горизонтов зимой структура поля *АРЕ* похожа на летнюю и повышенные значения в эксперименте 2 также наблюдаются на периферии бассейна и превышают данные эксперимента 1 примерно в два раза.

### Заклучение

В работе на примере 2016 г. проведен численный анализ запаса ДПЭ и составляющих ее бюджета в Черном море, полученных при использовании в модели МГИ новой схемы аппроксимации температуры и солености в операторе адвективного переноса для уравнений адвекции – диффузии тепла и соли (эксперимент 2). Выполнено сравнение энергетических характеристик циркуляции с оценками, полученными ранее на основе традиционной схемы аппроксимации (эксперимент 1). Обнаружены различия как в интегральных величинах, так и в пространственном распределении ДПЭ, работы силы плавучести, горизонтальной диффузии. Получено, что запас ДПЭ в эксперименте 2 в среднем за год на 30 % больше, чем в эксперименте 1. Причем в теплый период года эта разница обусловлена уменьшением горизонтальной диффузии, а в холодный – уменьшением количества ДПЭ, которая расходуется на трансформацию в кинетическую энергию вследствие работы силы плавучести.

Как показал анализ, количественные и качественные несоответствия в распределениях ДПЭ и компонентов ее бюджета между результатами двух экспериментов обусловлены различиями в полях аномалии плотности морской воды. Так, в эксперименте 2 летом 2016 г. запас ДПЭ в верхнем слое был меньше, чем в эксперименте 1, вследствие уменьшения модуля аномалии плотности на СЗШ, а зимой, наоборот, выше вследствие формирования обширных областей отрицательных аномалий плотности в западной части моря, соответствовавших антициклоническим вихревым образованиям. В течение всего года повышенные по сравнению с экспериментом 1 значения ДПЭ ниже горизонта 100 м связаны с увеличением аномалий плотности вблизи материкового склона вследствие интенсификации мезомасштабных вихрей.

Как показала валидация модельных термохалинных полей, использование схемы аппроксимации (2) позволяет точнее воспроизвести соленость, а следовательно, и плотность, тем самым обеспечивая более корректный расчет ДПЭ в верхнем слое Черного моря. Ниже горизонта 300 м не обнаружено значимых расхождений между температурой и соленостью в двух расчетах и данными наблюдений, но при этом для энергетических характеристик выявлены существенные качественные и количественные различия: в эксперименте 2 увеличивается разница в значениях ДПЭ в центральной части и на периферии бассейна и возрастает площадь зон экстремальных значений работы силы плавучести.

Как видно из результатов работы, изменение модельных температуры и солености, связанное с новой схемой расчета адвективного переноса тепла и соли, вызывает изменение не только плотности и ДПЭ, но и слагаемых бюджета, описывающих процессы диффузии. Анализ показал, что области уменьшения потока энергии, обусловленного горизонтальной диффузией, пространственно соответствуют зонам уменьшения горизонтальных градиентов солености. Таким образом, использование новой схемы аппроксимации опосредованно через изменение плотности способствует уменьшению диссипации доступной потенциальной энергии. Также следует отметить, что, по предварительным оценкам, полученным в [9], изменение схемы расчета температуры и солености приводит к интенсификации подъема глубинных вод в центральной части моря; следовательно, изменение адвекции влияет на вертикальное перемешивание и глубокую конвекцию, однако данный вопрос выходит за рамки представленной работы и планируется как тема отдельного исследования.

Полученные результаты полезны для анализа механизмов эволюции мезомасштабных вихрей на основе оценки энергетических вкладов таких физических процессов, как диссипация, неустойчивость, работа сил плавучести и давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана : в 2 т. М. : Мир, 1986. Т. 2. 415 с.
3. An estimate of the Lorenz energy cycle for the World Ocean based on the 1/10° STORM/NCEP simulation / J.-S. von Storch [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, iss. 12. P. 2185–2205. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-079.1>
4. A global diagnosis of eddy potential energy budget in an eddy-permitting ocean model / Y. Guo [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2022. Vol. 52, iss. 8. P. 1731–1748. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0029.1>

5. *Cronin M., Watts D. R.* Eddy-mean flow interaction in the Gulf Stream at 68°W. Part I: Eddy energetics // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, iss. 10. P. 2107–2131. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<2107:EFIITG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<2107:EFIITG>2.0.CO;2)
6. Mesoscale air-sea interaction and its role in eddy energy dissipation in the Kuroshio Extension / H. Yang [et al.] // *Journal of Climate*. 2019. Vol. 32, iss. 24. P. 8659–8676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0155.1>
7. *Holland W. R.* Energetics of baroclinic oceans // *Numerical models of ocean circulation : proceedings of a symposium held at Durham, New Hampshire, October 17–20, 1972*. Washington : National Academy Press, 1975. P. 168–177.
8. *Демьшев С. Г.* Дискретное уравнение для доступной потенциальной энергии как точное следствие конечно-разностных уравнений модели динамики моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 3. С. 239–255. EDN TLFKED.
9. *Демьшев С. Г.* Нелинейные инварианты дискретной системы уравнений динамики моря в квазистатическом приближении // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 557–583. EDN JWSUUM
10. *Демьшев С. Г., Дымова О. А.* Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при использовании новых схем аппроксимации уравнений адвекции-диффузии тепла и соли // *Многофазные системы*. 2023. Т. 18, № 4. С. 378–381. <https://doi.org/10.21662/mfs2023.4.117>
11. *Demyshev S., Dymova O.* Analysis of the annual mean energy cycle of the Black Sea circulation for the climatic, basin-scale and eddy regimes // *Ocean Dynamics*. 2022. Vol. 72, iss. 3–4. P. 259–278. <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01504-0>
12. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence close model for geophysical fluid problems // *Review of Geophysics*. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
13. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана СПб. : Гидрометеоиздат, 1991. 426 с.*
14. High and ultra-high resolution processing of satellite sea surface temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project / B. Buongiorno Nardelli [et al.] // *Remote Sensing Environment*. 2013. Vol. 129. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.012>
15. *Arakawa A., Lamb V. R.* A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, iss. 1. P. 18–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2)
16. Information resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: current state and development prospects / Т.М. Bayankina [et al.] // *Processes in GeoMedia – Volume II*. Cham : Springer, 2021. P. 187–197. (Springer Geology). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_22)
17. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
18. *Demyshev S., Dymova O., Miklashevskaya N.* Seasonal variability of the dynamics and energy transport in the Black Sea by simulation data // *Water*. 2022. Vol. 14, iss. 3. 338. <https://doi.org/10.3390/w14030338>
19. *Булгаков С. Н., Коротаев Г. К.* Возможный механизм стационарной циркуляции вод Черного моря // *Комплексные исследования Черного моря. Севастополь, 1984. С. 32–40.*

*Об авторе:*

**Дымова Ольга Алексеевна**, ведущий научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7565-1082**, **ORCID ID: 0000-0003-4036-2447**, **ResearcherID: P-9669-2015**, **Scopus Author ID: 6508381809**, [olgadymova@mhi-ras.ru](mailto:olgadymova@mhi-ras.ru)

Научная статья

УДК 551.46.0+551.468.1+519.688  
EDN: UEZOCE

## Численное исследование гидродинамического режима вод Таганрогского залива Азовского моря

**Б. В. Дивинский**

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия*  
✉ [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

Поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024;  
принята к публикации 17.07.2024.

### *Аннотация*

*Цель.* Исследованы гидродинамические условия формирования песчаных кос Таганрогского залива Азовского моря с точки зрения морфологических особенностей кос.

*Методы и результаты.* Анализ проведен на основе результатов численного моделирования гидродинамических параметров всего Азовского моря за 42 года – с 1979 по 2020 г. Сформированный массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений придонных течений, а также значительных высот и направлений распространения ветровых волн. Установлены существенные различия в гидродинамическом режиме в районах песчаных кос северного (Белосарайская, Кривая) и южного (Очаковская, Чумбурская, Сазальникская, Ейская) побережий.

*Выводы.* В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос преобладает повторяемость течений с востока. Для Беглицкой (северное побережье), Очаковской и Сазальникской (южное побережье) кос характерно доминирование течений западных направлений. В районе Белосарайской и Кривой кос среднегодовое значения скоростей течений восточных потоков незначительно превосходят скорости течений западных направлений. В районе косы северного побережья Беглицкой, а также кос Очаковской, Чумбурской, Сазальникской и Ейской южной части залива заметно доминирование течений с запада, причем как по средним скоростям, так и по максимальным. В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос высоты волн восточных направлений несколько превосходят как по средним, так и по максимальным показателям высоты при волнении западных румбов. Косы Беглицкая, Очаковская, Чумбурская, Сазальникская и Ейская испытывают в среднем доминирование волнения западного направления, но волнение с максимальными высотами волн развивается при восточных штормах.

**Ключевые слова:** Азовское море, песчаные косы, гидродинамические условия, численное моделирование

**Благодарности:** работа выполнена в соответствии с темой госзадания ИО РАН (№ FMWE-2024-0027).

**Для цитирования:** Дивинский Б. В. Численное исследование гидродинамического режима вод Таганрогского залива Азовского моря // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 738–751. EDN UEZOCE.

## Numerical Study of Hydrodynamic Regime of the Taganrog Bay Waters in the Sea of Azov

B. V. Divinsky

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*  
✉ [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

### Abstract

**Purpose.** The work is aimed at studying the hydrodynamic conditions of formation of the sand spits in Taganrog Bay of the Azov Sea from the viewpoint of the morphological features of spits.

**Methods and Results.** The analysis is based on the results of numerical modeling the hydrodynamic parameters of the entire Azov Sea over 42 years, from 1979 to 2020. The generated data array consists of the hourly spatial fields of bottom current velocities and directions, as well as the wind wave significant heights and directions of their propagation. A significant difference between the sand spit hydrodynamic regimes of the northern (Belosarayskaya and Krivaya spits) and southern (Ochakovskaya, Chumburskaya, Sazalnikskaya and Yeyskaya ones) coasts has been established.

**Conclusions.** In the coastal waters of the Belosarayskaya and Krivaya spits (the northern coast), the frequency of currents from the east prevails. The Beglitskaya (the northern coast), Ochakovskaya and Sazalnikskaya (the southern coast) spits are characterized by the predominance of currents from the west. In the region of the Belosarayskaya and Krivaya spits, the long-term mean velocities of the currents directed to the east are slightly higher than those of the currents directed to the west. In the areas of the Beglitskaya spit (the northern coast), as well as the Ochakovskaya, Chumburskaya, Sazalnikskaya and Yeyskaya spits in the southern part of the bay, the eastward directed currents dominate noticeably, both in terms of mean and maximum speeds. In the coastal waters of the Belosarayskaya and Krivaya spits, both the mean and maximum heights of the waves propagating to the east slightly exceed those of the waves propagating to the west. As for the Beglitskaya, Ochakovskaya, Chumburskaya, Sazalnikskaya and Yeyskaya spits, the dominating westward direction of wave propagation is, on average, a characteristic feature, whereas the waves of maximum heights develop during the eastern storms.

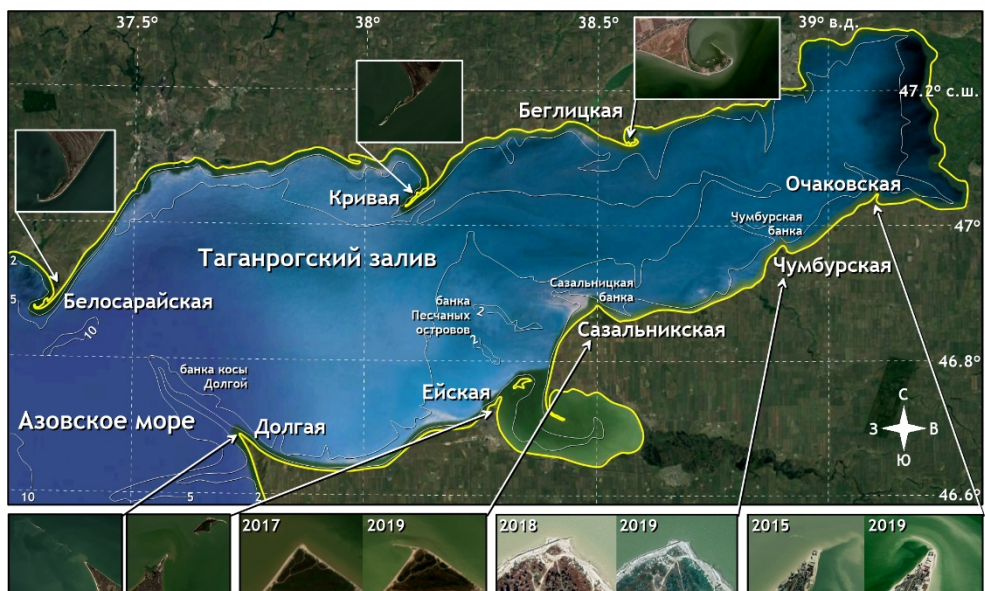
**Keywords:** Sea of Azov, sand spits, hydrodynamic conditions, numerical modeling

**Acknowledgements:** The work was carried out in accordance with the theme of state assignment of IO RAS (No. FMWE-2024-0027).

**For citation:** Divinsky, B.V., 2024. Numerical Study of Hydrodynamic Regime of the Taganrog Bay Waters in the Sea of Azov. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 694-706.

### Введение

Таганрогский залив расположен в северо-восточной части Азовского моря. Длина залива составляет 135 км, характерная ширина – 30 км. По отношению к основной акватории Азовского моря Таганрогский залив довольно мелководен; средняя глубина ~ 5 м [1]. Характерными геоморфологическими формами прибрежной зоны залива, как, впрочем, и всего моря, являются песчаные косы (рис. 1).



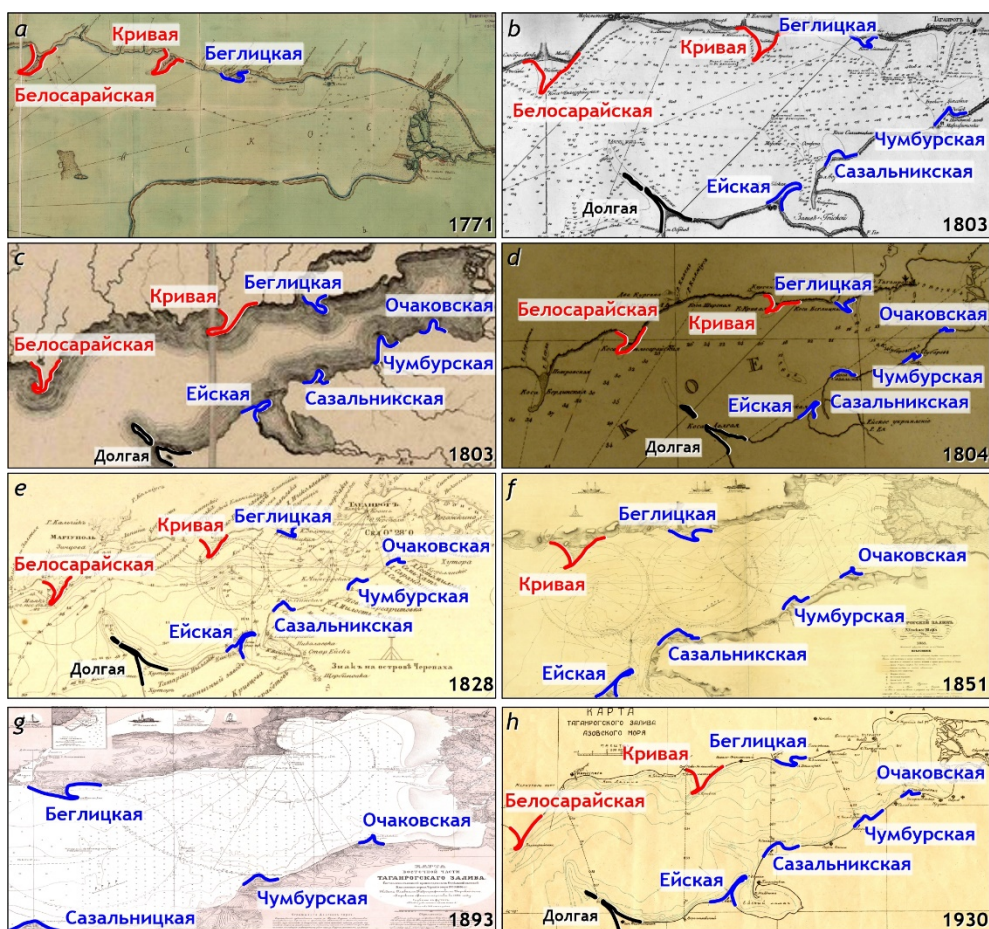
**Р и с. 1.** Батиметрическая карта и морфометрические особенности Таганрогского залива Азовского моря (*сверху*); примеры кардинальной перестройки кос (*снизу*)  
**Fig. 1.** Bathymetry map and morphometric features of Taganrog Bay in the Sea of Azov (*on the top*); examples of radical reshaping of spits (*on the bottom*)

На северном побережье наиболее развиты, значительно выдвинуты в открытое море косы Белосарайская, Кривая и Беглицкая. При этом генеральное направление Белосарайской и Кривой кос – с востока на запад, Беглицкой – обратное. В южной части залива косы Очаковская, Чумбурская, Сазальникская и Ейская морфометрически направлены с запада на восток, при этом сами оконечности всех кос, кроме Ейской, временами могут простираться и в обратном направлении. Также с востока на запад направлены подводные продолжения этих кос, хорошо прослеживаемые изобатой 2 м на рис. 1. Дистальная часть косы Долгой, непосредственно ограничивающей с южной стороны Таганрогский залив, в зависимости от гидродинамических условий выгибается то в сторону залива, то в сторону открытого моря.

Отметим, что подобная картина наблюдалась и в прошлом (рис. 2). Красным цветом на рис. 2 выделены косы, направленные с востока на запад, синим – с запада на восток. На каждой карте приведен соответствующий год издания.

Рисунок 2 наглядно демонстрирует, что указанные выше особенности морфологического облика Таганрогского залива являются устойчивыми по крайней мере последние 250 лет.





**Р и с. 2.** Исторические карты Таганрогского залива (источник: интернет-архивы papacoma.narod.ru; www.etomesto.ru)  
**Fig. 2.** Historical maps of Taganrog Bay (source: internet archives papacoma.narod.ru; www.etomesto.ru)

Пространственные положения основных кос Таганрогского залива (исключая косу Долгую) сведены в таблице.

### Генеральные направления кос Таганрогского залива General directions of the spits in Taganrog Bay

Побережье / Coast	Коса / Spit	Направление / Direction
Северное / Northern	Белосарайская / Belosarayskaya	В-З / E-W
	Кривая / Krivaya	В-З / E-W
	Беглицкая / Beglitskaya	З-В / W-E
Южное / Southern	Очаковская * / Ochakovskaya *	З-В / W-E
	Чумбурская * / Chumburskaya *	З-В / W-E
	Сазальническая * / Sazalnikskaya *	З-В / W-E

\* Направление оконечности В-З, З-В. /

\* Direction of extremity E-W, W-E.

Еще раз укажем, что, за исключением косы Беглицкой, песчаные косы **северной** части Таганрогского залива (Белосарайская и Кривая) ориентированы **с востока на запад**. Косы **южного** побережья (Очаковская, Чумбурская, Сазальникская, Ейская), а также Беглицкая коса северного побережья, направлены в обратную сторону – с **запада на восток**. Итак, как следует из рис. 1, 2, в развитии кос северного и южного побережий залива обнаруживаются определенные закономерности, исследования которых и составляют предмет настоящей работы.

Формирование и трансформация песчаных кос происходят под влиянием морфологических (условия залегания коренных пород, гранулометрический состав осадков, наличие/отсутствие подпитки пляжей) и гидродинамических (морские течения, преобладающее ветровое волнение, уровень моря) факторов. Морфо- и литодинамические особенности песчаных кос Таганрогского залива достаточно хорошо изучены. Обобщая результаты многочисленных исследований [2–8], отметим, что косы сложены в основном мелкозернистыми песками и крупными алевритами, которые с глубиной замещаются алевритовыми илами. Подводные основания кос, прослеживаемые до глубин ~ 3–4 м, состоят из песков с примесью ракуши и детрита. В целом, согласно работе [3], абразионные склоны северного и южного побережий залива обладают типологическим сходством.

Наиболее изученными гидродинамическими характеристиками вод Таганрогского залива являются ветровые нагоны, что связано в немалой степени с развитой системой наблюдений за уровнем моря на многочисленных гидрологических постах вдоль всего побережья Азовского моря [9–13]. Основная особенность залива – значительная амплитуда сгонно-нагонных явлений. К примеру, в Таганроге за период с 1882 по 1998 г. размах колебаний уровня моря составляет более 6 м [14].

Режим ветрового волнения Таганрогского залива (как части Азовского моря) подробно исследован в работах [15–17], в которых приведены климатические оценки основных параметров ветровых волн (высот, периодов, длин) на акватории всего Азовского моря. К сожалению, при анализе не учитывался ледовый покров, частично или полностью (что зависит от суровости атмосферных условий) покрывающий акваторию моря примерно с ноября по март. Присутствие льда непосредственно влияет на условия развития и трансформации ветрового волнения.

Параметры морских течений на акватории Таганрогского залива, полученные расчетным путем, проанализированы в нескольких научных пособиях [6, 15]. При этом основной недостаток данных заключается в том, что поля течений соответствуют только заданным направлениям и определенным градициям скорости ветра, другими словами, о климатических оценках характеристик течений речи не идет.

Итак, в предположении определенного морфологического сходства песчаных кос Таганрогского залива определим задачи настоящей работы:

- детально проанализировать гидродинамический режим вод Таганрогского залива;

– выявить возможные факторы, определяющие генеральную ориентацию кос северного побережья залива с востока на запад и южного – в обратном направлении, с запада на восток;

– предложить ответ на вопрос «Почему коса Беглицкая северного побережья не следует общему правилу и направлена с запада на восток?».

Кстати, в свое время еще известный советский исследователь В. П. Зенкович<sup>1</sup> отмечал, что косы Кривая и Беглицкая повернуты друг относительно друга «ровно на 90°» (реально несколько больше), но не задавался вопросом о причинах этого.

Основной метод исследований – математическое моделирование.

### Материалы и методы

Ключевыми факторами, определяющими гидродинамический режим акватории Таганрогского залива, являются морские течения, ветровое волнение, а также изменения уровня моря, вызванные штормовыми нагонами и сейшевыми колебаниями. В условиях мелководья эти факторы сильно взаимосвязаны. Повышение уровня трансформирует поля течений и волнения. Обрушение штормовых волн посредством радиационных напряжений корректирует величину и направление течений и, кроме того, увеличивает высоту нагонов. Картину усложняет возможное присутствие льда на акватории. С точки зрения моделирования протекающих гидродинамических процессов это означает, что раздельный расчет параметров течений, волнения и уровня является не совсем правильным. Более корректным является анализ всех процессов в рамках объединенной модели. Подобный метод реализован в более ранней работе автора [18] по исследованию гидродинамического режима всего Азовского моря с использованием следующих подходов:

1. Морские течения рассчитываются с помощью 5-слойной  $\sigma$ -координатной трехмерной модели ADCIRC, основанной на решении уравнений мелкой воды. Различные модификации модели хорошо себя зарекомендовали при исследованиях, в частности, экстремальных штормовых нагонов в Азовском море (например, в работе [9]).

2. Параметры ветрового волнения рассчитываются с использованием спектральной волновой модели *MIKE 21 SW* Датского гидравлического института, успешно применяемой для условий Азовского и Черного морей [19].

3. Необходимые для моделирования поля атмосферного давления, компонентов приземного ветра и концентрации льда выбираются из базы данных глобального атмосферного реанализа *ERA5*. Шаг по времени – 3 ч для полей атмосферного давления и ветра, одни сутки – для полей концентрации льда.

4. Расчетная сетка сформирована на основе современной батиметрической карты Азовского моря [6].

5. Объединение моделей, учитывающее взаимодействие течений и волнения, осуществляется следующим образом: определяемые в гидродинамической модели возвышение уровня и параметры течений используются в спек-

---

<sup>1</sup> Зенкович В. П. Берега Черного и Азовского морей. М. : Географгиз, 1958. С. 164.  
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024

тральной волновой модели при расчетах параметров ветрового волнения; радиационные напряжения, генерируемые процессами обрушения волн и рассчитываемые волновой моделью, корректируют параметры течений.

Объединенная модель верифицирована с привлечением доступных экспериментальных данных по параметрам морских течений, ветрового волнения и уровня моря. Данные включают в себя результаты измерений, выполненные с помощью специализированных приборов (мареографов, *RDI ADCP*, зонда «Вектор-2»), а также спутниковые наблюдения.

В результате проведенных расчетов сформирована база данных ежечасных пространственных полей параметров течений и ветрового волнения, покрывающих всю акваторию Азовского моря, включая Таганрогский залив. Расчетный период – 42 года, с января 1979 по декабрь 2020 г.

### Результаты и обсуждение

Вначале приведем несколько замечаний, уточняющих особенности используемого подхода к анализу гидродинамического воздействия на прибрежную зону:

1. Используются данные о характеристиках морских течений и ветрового волнения. Колебания уровня моря, точнее, штормовые нагоны, отдельно не рассматриваются, поскольку в процессе нагонов трансформируются как поля течений, так и волнения, уже непосредственно влияющие на деформации морского дна и береговой линии.

2. Применение трехмерной гидродинамической модели дает возможность анализировать именно придонные течения, ответственные за первоначальное взвешивание и перераспределение донного материала в прибрежной зоне моря.



Р и с. 3. Розы придонных течений (%) за 1979–2020 гг.

F i g. 3. Roses of bottom currents (%) in 1979–2020

На рис. 3 и 4 приведены соответственно розы придонных течений и ветрового волнения (в терминах значительных высот волн) в нескольких точках ак-

ватории Таганрогского залива. Поскольку в климатическом выражении преобладают относительно слабые течения и волнение, в данных, использованных для построения рис. 3, 4, не учитывались скорости течений меньше 0,1 м/с и высоты волн меньше 0,1 м. Повторяемости по скоростям течений или высотам волн и направлениям представлены для трех кос северного побережья (Белосарайской, Кривой, Беглицкой) и пяти – южного (Очаковской, Чумбурской, Сазальникской, Ейской, Долгой).



**Р и с. 4.** Розы ветрового волнения (%) за 1979–2020 гг.  
**Fig. 4.** Roses of wind waves (%) in 1979–2020

Как показывают данные рис. 3, в прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос повторяемость северо-восточных придонных течений в полтора раза превышает повторяемость юго-западных. Для Беглицкой косы характерно абсолютное доминирование (почти 80 %) западных течений. В районе Очаковской косы течения (напомним: со скоростями, превышающими 0,1 м/с) почти всегда направлены с запада на восток. В водах, омывающих Чумбурскую косу, повторяемость восточных течений несколько выше, чем юго-западных (55 и 38 % соответственно), но сильные течения со скоростями больше 0,2 м/с наблюдаются именно при течениях юго-западного сектора. Аналогичная картина характерна и для Ейской косы (60 % – восточные течения, 40 % – западные). К тому же на Ейской косе довольно высока повторяемость крайне сильных (более 0,25 м/с) западных течений, составляющая почти 5 %. В районе Сазальникской косы в 50 % случаев наблюдаются западные течения, в 30 % – восточные. Для косы Долгой характерно преобладание восточных течений (58 %); сильные течения могут формироваться как со стороны открытого моря, так и со стороны залива.

Степень развития ветрового волнения зависит от множества факторов: силы, устойчивости по направлению и времени действия ветрового потока, длины разгона, батиметрических особенностей. В нашем случае наиболее сильное ветровое волнение проявляется на входе в Таганрогский залив, а также в районе косы Беглицкой (рис. 4).

Волновой режим Белосарайской косы определяет волнение восточных (33 %), юго-западных (23 %) и южных (21 %) направлений. Для косы Кривой характерно доминирование волнения восточных (45 %) и юго-западных (31 %) румбов. В отличие от Белосарайской и Кривой, третья коса северного побережья, Беглицкая, испытывает преобладающее влияние штормов юго-западного направления. Очаковская коса, в силу своего положения и мелководности прибрежной зоны, наиболее защищена от сильного волнения; волны северо-восточного направления вносят наибольший вклад в формирование волнового режима. Для трех следующих кос южного побережья залива (Чумбурской, Сазальникской и Ейской) преобладает влияние северо-восточного волнения, но при этом наиболее сильные штормы приходят, как правило, с запада. В районе косы Долгой интенсивное волнение возможно практически со всех направлений, исключая, очевидно, южные и юго-восточные секторы.

Дополним картину некоторыми статистическими характеристиками значительных высот волн и скоростей придонных течений. На рис. 5, 6 приведены «ящики с усами» распределений соответственно высот волн и скоростей течений, включающие минимальные, максимальные и средние значения параметров, а также 5- и 95-процентные квантили распределений. Распределения построены отдельно для вдольбереговых течений, направленных условно с запада на восток (синие «ящики»), и обратных течений с востока на запад (красные). Для высот волн данные статистики аналогичны с тем лишь отличием, что сектор волнения («запад» или «восток») определяется по отношению к нормали к береговой линии.

Ветровое волнение наиболее развито в проливе и на северо-западном побережье залива (рис. 5).



**Рис. 5.** Статистические характеристики распределений значительных высот волн (м) за 1979–2020 гг.

**Fig. 5.** Statistical characteristics of the distributions of significant wave heights (m) in 1979–2020

В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос высоты волн восточных направлений несколько превосходят как по средним, так и по максимальным показателям высоты волн при волнении западных румбов. Косы Беглицкая,

Очаковская, Чумбурская, Сазальникская и Ейская подвержены сравнительно более слабому волнению. Для этих кос наблюдается в среднем доминирование волнения западного направления, но волнение с максимальными высотами волн развивается при восточных штормах. У косы Долгой складывается обратная ситуация: средняя высота волн у волнения восточных направлений превосходит среднюю высоту, характерную для западного волнения, но максимальные волны развиваются в штормах, приходящих с запада, со стороны открытого моря.

Наиболее сильные придонные течения с максимальными скоростями  $\sim 0,8$  м/с образуются в западной части залива (рис. 6).



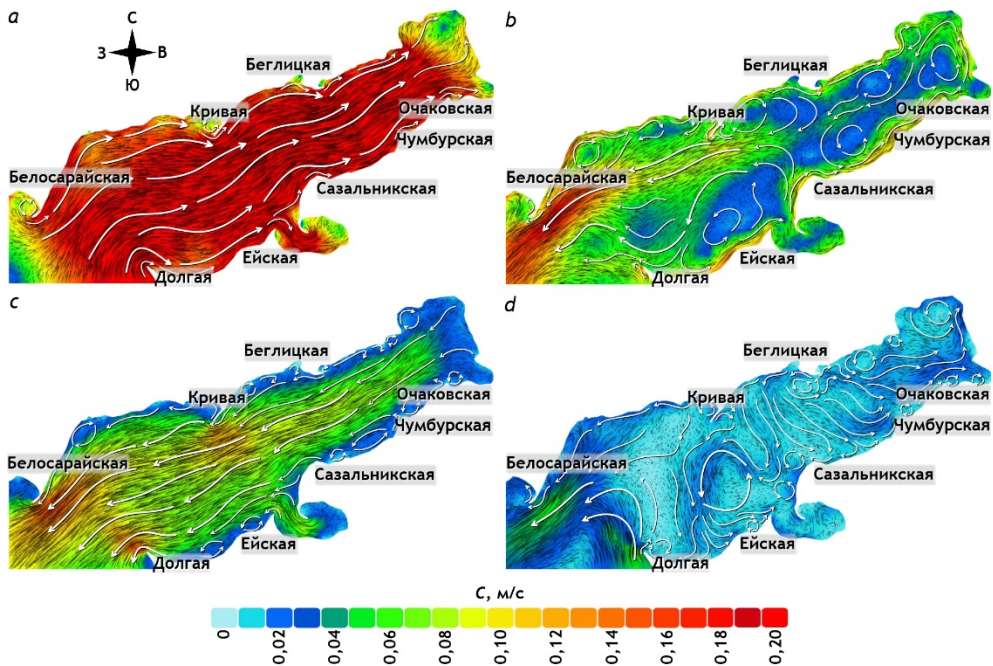
**Р и с. 6.** Статистические характеристики распределений скоростей придонных течений (м/с) за 1979–2020 гг.

**F i g. 6.** Statistical characteristics of the distributions of bottom current velocities (m/s) in 1979–2020

В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос западные и восточные потоки вод практически сопоставимы по скоростям, при этом среднемноголетние значения скоростей течений восточных потоков незначительно превосходят скорости течений западных направлений. В районе косы северного побережья Беглицкой, а также кос Очаковской, Чумбурской, Сазальникской и Ейской южной части залива заметно доминирование течений с запада, причем как по средним скоростям, так и по максимальным. При этом крайне небольшое исключение составляет режим вод у Сазальникской косы, где наибольшие скорости развиваются при восточных течениях. У косы Долгой климатические средние скорости восточных и западных течений равны, но максимальные скорости потоков характерны для течений из основной акватории моря в Таганрогский залив, превышая скорости течений обратных направлений почти в полтора раза.

Заметим, что пространственное положение Таганрогского залива, а именно вытянутость по линии ЗЮЗ – ВСВ, соответствует направлениям преобладающих ветров над акваторией залива, что способствует развитию сгонно-нагонных явлений, во многом определяющих циркуляцию вод. На рис. 7 в качестве примера представлены схематические карты, отображающие магнитуду

и направление придонных течений во время прохождения сильного ЮЗ шторма (*a*); ослабления ЮЗ шторма (*b*); развития СВ ветра (*c*); ослабления СВ ветра (*d*).



**Рис. 7.** Поля скоростей (м/с) придонных течений Таганрогского залива в условиях: *a* – сильного ЮЗ ветра; *b* – ослабления ЮЗ ветра; *c* – сильного СВ ветра; *d* – ослабления СВ ветра

**Fig. 7.** Velocity fields (m/s) of bottom currents in Taganrog Bay under conditions of: *a* – strong SW wind; *b* – weakening of SW wind; *c* – strong NE wind; *d* – weakening of NE wind

Как следует из рис. 7, *a*, во время прохождения ЮЗ шторма на всей акватории залива устанавливается однородное по направлению придонное течение с ЮЗ на СВ, вызванное ветровым нагоном. В заливах между основными телами Белосарайской, а также Кривой косы и материком образуются небольшие циклонические завихрения, вызывающие движение вод обратного направления. С ослаблением ЮЗ ветра (рис. 7, *b*) ветровой нагон уступает место сгону, при этом циркуляция в заливе существенно перестраивается. Районы Белосарайской, Кривой и Долгой кос находятся под влиянием течений, направленных с СВ на ЮЗ, Беглицкой, Очаковской, Чумбурской, Сазальникской и Ейской – обратных, с ЮЗ на СВ. Развитие СВ ветра (рис. 7, *c*) у Белосарайской, Кривой, Сазальникской, Ейской и Долгой кос формирует вдольбереговой поток, направленный в сторону открытого моря. В этой же ситуации у Беглицкой косы образуется локальная циркуляция вод: у западной части косы поток направлен на ЮЗ, у восточной – на СВ. В прибрежной зоне Очаковской и Чумбурской кос вдольбереговой поток ориентирован на СВ. Затухание СВ ветра (рис. 7, *d*) приводит к ослаблению течений почти на всей акватории залива, за исключением вод пролива, где развиваются заметные потоки только у Белосарайской (направленных на ЮЗ) и Долгой (на С, СВ) кос. В прибрежных водах



остальных кос складываются местные системы течений, состоящие, как правило, из встречных слабых потоков.

Заметим, что схемы, приведенные на рис. 7, служат лишь некими графическими иллюстрациями конкретных гидродинамических ситуаций и не отображают все разнообразие возможных структур течений на акватории залива. Вместе с тем рис. 7 дает представление о важной особенности придонной циркуляции вод: непосредственно в прибрежной зоне, точнее в небольших заливах между косами, могут формироваться противотечения по отношению к генеральному потоку вод в основном русле Таганрогского залива.

### Выводы

Объекты нашего исследования – песчаные косы Таганрогского залива Азовского моря, вернее, особенности их пространственного положения. Генеральное направление Белосарайской и Кривой кос северного побережья – с востока на запад, Беглицкой – обратное, с запада на восток. Также с запада на восток вытянуты косы южной части залива: Очаковская, Чумбурская, Сазальникская и Ейская. Исходя из этого, возникают закономерные вопросы:

1) Какие факторы способствуют ориентации кос северного побережья залива с востока на запад и южного – в обратном направлении, с запада на восток?

2) Почему коса Беглицкая северного побережья не следует общему правилу и направлена с запада на восток?

Мы предлагаем ответы на эти вопросы с гидродинамической точки зрения, т. е. нами исследованы климатические характеристики морских течений и ветрового волнения, непосредственно влияющие на формирование и трансформацию береговой линии. Не учитываются различия кос в литодинамическом отношении, а также вполне возможное техногенное воздействие на прибрежную зону (изъятие песка, возведение защитных сооружений).

Анализ проведен на основе результатов численного моделирования гидродинамических параметров всего Азовского моря за 42 года – с 1979 по 2020 г. Сформированный массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений придонных течений, а также значительных высот и направлений распространения ветровых волн.

В результате проведенной работы установлено, что:

1. В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос (северное побережье) преобладает повторяемость течений с востока. Для Беглицкой (северное побережье), Очаковской и Сазальникской (южное побережье) кос характерно доминирование течений с запада. В водах, омывающих Чумбурскую и Ейскую косы (южное побережье), повторяемость восточных течений несколько выше, чем юго-западных, но сильные течения со скоростями более 0,2 м/с наблюдаются именно при течениях с запада.

2. В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос (северное побережье) среднемноголетние значения скоростей течений восточных потоков незначительно превосходят скорости течений западных направлений. В районе косы северного побережья Беглицкой, а также кос Очаковской, Чумбурской, Сазальникской и Ейской южной части залива заметно доминирование течений с запада, причем как по средним скоростям, так и по максимальным. При этом

небольшое исключение составляет режим вод у Сазальникской косы, где наибольшие скорости развиваются при восточных течениях.

3. В прибрежных водах Белосарайской и Кривой кос (северное побережье) высоты волн восточных направлений несколько превосходят как по средним, так и по максимальным показателям высоты при волнении западных румбов. Косы Беглицкая (северное побережье), Очаковская, Чумбурская, Сазальникская и Ейская (южное побережье) испытывают в среднем доминирование волнения западного направления, но волнение с максимальными высотами волн развивается при восточных штормах.

Таким образом, установлено существенное различие в гидродинамическом режиме песчаных кос северного (Белосарайской, Кривой) и южного (Очаковской, Чумбурской, Сазальникской, Ейской) побережий. Климатические характеристики волнения (уточним: по отношению к нормали к берегу) и течений косы Беглицкой на севере залива близки к гидродинамическому режиму кос южного берега, что и определяет, вполне вероятно, ее вытянутость с востока на запад.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таганрогский залив Азовского моря: современное состояние и проблемы природопользования / А. Е. Косолапов [и др.]. Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2012. 554 с.
2. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006 / Eds. G. Matishov, S. Levitus. U.S. Washington, D. C. : Government Printing Office, 2006. 103 p. (NOAA Atlas NESDIS ; 59).
3. Беспалова Л. А., Беспалов А. А. Подводные ландшафты Азовского моря и их экодиагностика // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2006. Т. 3, № 3. С. 23–30. EDN KUAQVH.
4. Ивлиева О. В. Особенности осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. 320 с.
5. Маев Е. Г., Мысливец В. И., Зверев А. С. Строение верхнего слоя осадков и рельеф дна Таганрогского залива Азовского моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 5. С. 78–82. EDN KZAPPT.
6. Экологический атлас Азовского моря / гл. ред. акад. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с.
7. Литология и биостратиграфия голоценовых отложений Азовского моря: итоги 15-летних исследований / Г. Г. Матишов [и др.] // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 3. С. 24–34. EDN FVZSPU. <https://doi.org/10.7868/S25000640190303>
8. Матишов Г. Г., Польшин В. В. Новые результаты по истории Азовского моря в голоцене // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489, № 2. С. 190–194. EDN FCORGJ. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524892190-194>
9. Фомин В. В., Полозок А. А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2013. Вып. 27. С. 139–145.
10. Матишов Г. Г., Бердников С. В. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // Известия РАН. Серия географическая. 2015. № 1. С. 111–118. EDN TNXQHV.
11. Попов С. К., Лобов А. Л. Моделирование изменений уровня Азовского моря в 2015–2016 годах // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 131–143. EDN YRYHWZ.


12. *Попов С. К., Лобов А. Л.* Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 104–118. EDN VMYBYW.
13. Штормовые нагоны в Азовском море и их влияние на абразионные процессы / Л. А. Беспалова [и др.] // Труды Южного научного центра Российской академии наук. Ростов-на-Дону : ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, 2020. Т. 8. С. 111–121. EDN ENPQEV. <https://doi.org/10.23885/1993-6621-2020-8-111-121>
14. *Дьяков Н. Н., Фомин В. В.* Синоптические условия возникновения аномальных колебаний уровня Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 250. С. 332–342.
15. Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря / под редакцией В. В. Фомина. Киев, 2012. 238 с.
16. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В. П. Евстигнеев [и др.]. Севастополь : ИПТС, 2017. 320 с. <https://doi.org/10.33075/978-5-6040795-0-8>
17. *Yaitskaya N.* The Wave Climate of the Sea of Azov // Water. 2022. Vol. 14, iss. 4. 555. <https://doi.org/10.3390/w14040555>
18. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Фомин В. В.* Климатические поля морских течений и ветрового волнения Азовского моря // Доклады Российской Академии наук. Науки о земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 94–107. EDN ANVNAF. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090085>
19. *Divinsky B., Kosyan R.* Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // Oceanologia. 2018. Vol. 60, iss. 3. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>

*Об авторе:*

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

## Особенности водообмена между бассейнами Черного и Мраморного морей по результатам численного моделирования с упрощенным представлением пролива

А. И. Мизюк , Г. К. Коротаев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
 [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

Поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 28.06.2024;  
принята к публикации 13.07.2024.

### Аннотация

**Цель.** Анализируется адекватность воспроизведения процессов массо-, тепло- и солепереноса через пролив Босфор по результатам численного моделирования совместной циркуляции вод Эвксинского каскада с упрощенным описанием пролива, обусловленным пространственным разрешением используемой модели.

**Методы и результаты.** В работе используется региональная конфигурация модели *NEMO* с пространственным разрешением около 1 км, позволяющая воспроизводить мезо- и субмезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в морях Эвксинского каскада. Кратко представлено ее описание. Численный эксперимент выполнен для периода 2008–2009 гг. Реконструированные в ходе эксперимента поля солёности и скоростей течений в сечении пролива подтверждают наличие двуслойной структуры циркуляции вод – верхне- и нижнебосфорского течений. Кроме того, они демонстрируют наличие периодов полной или частичной блокировки как верхнего, так и нижнего течений. Несмотря на грубую конфигурацию пролива, воспроизведенные в нем особенности солеобмена хорошо согласуются с аналогичными, но полученными на основе конечно-элементной модели с более высокой пространственной детализацией в проливе, и несколько хуже согласуются по температуре. В то же время, реконструированные скорости течений показали довольно точное соответствие событий блокировки при сопоставлении с измерениями, выполненными ранее.

**Выводы.** Подтвержден ранее установленный механизм поддержания верхнебосфорского течения в зимний период, обусловленный подъемом уровня Черного моря в прибосфорском районе, вследствие интенсификации ОЧТ. Модель качественно верно описывает реакцию пролива на изменения как ветрового воздействия, так и плотности морской воды в окрестности северного и южного входов в пролив. Блокировки верхнебосфорского течения происходят и могут быть вызваны интенсификацией течений в Мраморном море, обусловленных ветровым воздействием, и последующим ослаблением ОЧТ. При ослаблении мраморноморской циркуляции в зимне-весенний период можно наблюдать обратные явления, при которых наблюдаются события блокировки нижнебосфорского течения.

**Ключевые слова:** численное моделирование, Черное море, Босфор, Мраморное море, солеобмен, высокое разрешение

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений».


Для цитирования: Мизюк А. И., Коротаев Г. К. Особенности водообмена между бассейнами Черного и Мраморного морей по результатам численного моделирования с упрощенным представлением пролива // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 752–765. EDN FXYCFW.

Original article

## Features of Water Exchange between the Black and Marmara Sea Basins Based on the Results of Numerical Simulation with a Simplified Representation of the Strait

A. I. Mizyuk , G. K. Korotaev

*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

 *artem.mizyuk@mhi-ras.ru*

### *Abstract*

*Purpose.* The study is purposed at analyzing the adequacy of reconstruction of mass, heat and salt transfer processes through the Bosphorus Strait based on the results of numerical simulation of joint circulation of the Euxine Cascade waters involving a simplified description of the strait due to the model spatial resolution.

*Methods and Results.* A regional configuration for the *NEMO* model (spatial resolution is about 1 km) which allows simulating the meso- and submeso-scale variability of hydrophysical fields in the Euxinus cascade seas is used. It is briefly described. The numerical experiment covers the period 2008–2009. The salinity and current velocity fields in the strait cross-section reconstructed in the experiment confirm a two-layer structure of water circulation, i.e. the presence of upper and lower Bosphorus currents. Besides, they show the availability of periods of complete or partial blocking both the upper and lower currents. Despite a somewhat rough configuration of the strait, the reconstructed salt exchange features are in good agreement with the similar ones obtained on the basis of a finite-element model with a higher spatial detailing in the strait, and as for temperature, the agreement is to some extent worse. At the same time, the reconstructed current velocities show a fairly accurate correspondence of the blocking events when compared to the earlier performed measurements.

*Conclusions.* The previously revealed mechanism for maintaining the upper Bosphorus Current in winter conditioned by a rise of the Black Sea level in the Bosphorus region due to the Rim Current intensification has been confirmed. The model qualitatively correctly describes the strait response to the changes both in wind forcing and seawater density in the vicinity of the northern and southern inlets to the strait. Blockings of the upper Bosphorus Current occur and can be induced by the intensification of currents in the Marmara Sea due to the wind forcing and subsequent weakening of the Black Sea Rim Current. In the winter-spring period, the Marmara Sea circulation weakens, and one can observe the reverse phenomena in which the lower Bosphorus current blockings take place.

**Keywords:** numerical modeling, Black Sea, Bosphorus, Sea of Marmara, salt exchange, high resolution

**Acknowledgements:** The study was carried out within the theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 “Analysis, hindcast and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on numerical modeling using the data of remote and *in situ* measurement methods”.

**For citation:** Mizyuk, A.I. and Korotaev, G.K., 2024. Features of Water Exchange between the Black and Marmara Sea Basins Based on the Results of Numerical Simulation with a Simplified Representation of the Strait. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 707-719.

### Введение

Водообмен через пролив Босфор двояко влияет на режим Черного моря. Прежде всего, совместно с речным стоком, осадками и испарением, а также

с Керченским проливом он формирует водный и солевой баланс бассейна. Характерный масштаб времени этого процесса определяется отношением объема вод Черного моря к величине расхода через проливы и составляет несколько сотен лет.

Последние наблюдения свидетельствуют, однако, что поступающие через проливы воды дают также вклад в мезомасштабную изменчивость полей бассейна. Это проявляется в распространении на большие расстояния объемов жидкости, отличающихся по своим свойствам от окружающих вод [1].

Можно предположить, что требования к модели пролива различны в зависимости от временного масштаба исследуемого явления. При моделировании многолетних изменений стратификации Черного моря для достижения аккуратного количественного описания водообмена необходимо стараться воспроизвести геометрию проливов с как можно большей подробностью. Иначе небольшие неточности в воспроизведении потоков соли через проливы при длительном интегрировании будут накапливаться с течением времени и искажать тренды эволюции полей бассейна. Детальное описание геометрии проливов требует значительного измельчения расчетной сетки [2]. Однако чтобы сохранить разумное время расчетов, в отмеченной работе авторы загрузили разрешение модели для открытой части Черноморского бассейна.

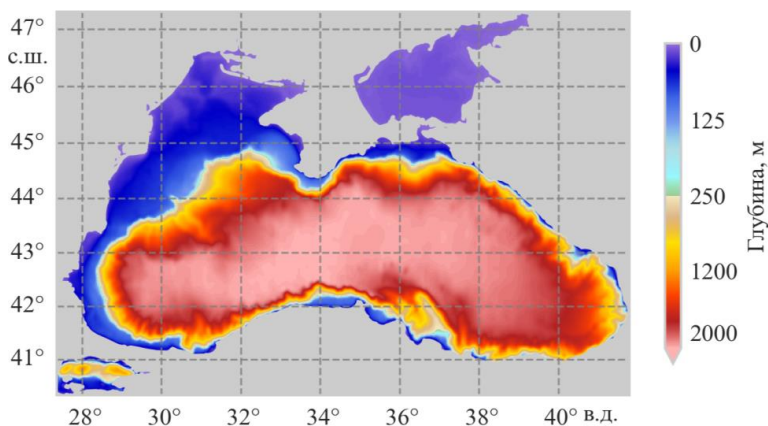
В то же время для исследования вклада водообмена через проливы в мезомасштабную изменчивость полей Черного моря, как представляется, возможно использовать более грубое описание проливов по сравнению с работой [2].

Отметим также, что пространственного разрешения около 1 км должно быть достаточно для адекватного воспроизведения динамики вод Мраморного моря [3]. В настоящей работе ставится цель продемонстрировать, что более простое описание пролива, которое получается при использовании сетки с таким разрешением, позволяет тем не менее воспроизводить в нем существенные особенности временной изменчивости процессов массо-, тепло- и солепереноса. Таким образом, появляется возможность моделирования вклада водообмена через пролив в относительно высокочастотную изменчивость полей Черного моря. Выбор соответствующего пространственного разрешения модели позволяет адекватно описать изменчивость полей Черного моря, вызванную распространением поступающих через пролив соленых средиземноморских вод.

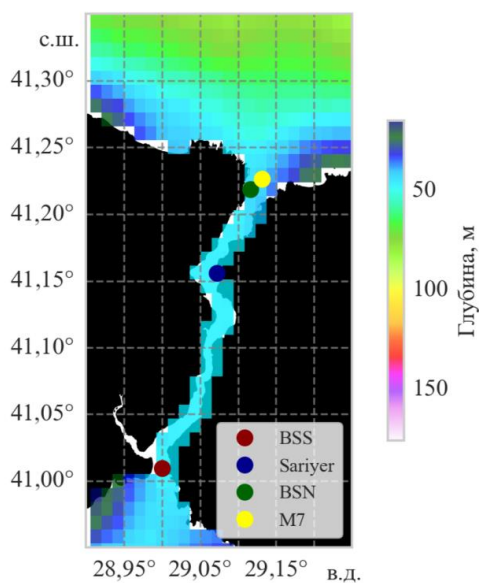
### Материалы и методы

В работе используются результаты, полученные в региональной конфигурации комплекса междисциплинарного моделирования компонентов океанских (морских) систем *Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO)* [4] с высоким пространственным разрешением, позволяющей воспроизводить мезо- и субмезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в морях Эвксинского каскада. Расчетный домен представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую бассейны Мраморного, Черного и Азовского морей с шагами  $1/96^\circ \times 1/69^\circ$  в меридиональном и зональном направлениях соответственно [5]. Разрешение приблизительно соответствует 1,157 км в меридиональном направлении. В зональном направлении шаг меняется равномерно от

1100 м на севере до 1230 м на юге. Топография дна построена на основе цифрового массива рельефа дна *EMODnet*<sup>1</sup> (рис. 1, *a*).



*a*



*b*

**Рис. 1.** Топография дна для региональной конфигурации *NEMO*: для всего расчетного домена (*a*) и в акватории пролива (*b*). Конфигурация берегов в проливе приведена по данным сайта <https://www.openstreetmap.org/>; точками на фрагменте *b* отмечены положения станций по аналогии с работой [2]: *BSS* – *Bosphorus Strait South*, *Sariyer* – мыс Сарьер, *BSN* – *Bosphorus Strait North*; станция *M7* взята из работы [6]

**Fig. 1.** Bottom topography for the *NEMO* regional configuration: for the entire numerical domain (*a*) and the strait water area (*b*). Configuration of the strait coasts is given according to the data from <https://www.openstreetmap.org/>; dots on fragment *b* indicate the station positions by analogy with [2]: *BSS* – *Bosphorus Strait South*, *Sariyer* – Cape Sarrier, *BSN* – *Bosphorus Strait North*; station *M7* is taken from [6]

<sup>1</sup> URL: <http://www.emodnet-bathymetry.eu> (date of access: 16.10.2016).

Моделирование водообмена через Босфор является сложной задачей ввиду существенной разницы пространственных масштабов процессов, развивающихся в проливе и в соединяемых им бассейнах. Тем не менее с использованием данного комплекса и с учетом принятой дискретизации по пространству возможно проводить расчеты в области пролива и, таким образом, рассматривать совместную динамику Черного и Мраморного морей. В построенной топографии конфигурация пролива учитывалась грубо (рис. 1, *b*, *c*), учитывалось только положение основных порогов у северного и южного входа в пролив. При этом глубина в проливе задавалась равной 48,5 м.

Гидродинамический блок комплекса основан на системе уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости, подробно описанной в [4]. Конечно-разностные аналоги уравнений реализованы для произвольной квазиортогональной сетки по шаблону «С» по терминологии Аракавы. Дискретизация по времени осуществляется посредством модифицированной схемы «чехарда» [7].

Для описания перемешивания по вертикали используется модель  $k$ - $\epsilon$  уровня замыкания 2 [8]. Обмен по горизонтали описывается бигармоническим оператором, действующим вдоль поверхности геопотенциала, с отрицательными коэффициентами вязкости и диффузии тепла и соли, равными по модулю  $4 \times 10^7$  и  $8 \times 10^6$  м<sup>4</sup>/с соответственно. В качестве уравнения состояния применяется формула ЮНЕСКО<sup>2</sup>. Конфигурация, используемая в настоящей работе, фактически является «даунскейлингом» конфигурации с разрешением  $1/24^\circ$ , приведенной в работе [9]. Отличия заключались главным образом в параметрах горизонтального турбулентного обмена и в шаге по времени, который в данной работе составляет 60 с.

Задание граничных условий на поверхности выполнено на основе полей температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, компонент горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, потоков нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, осадков в жидкой и твердой фазах, полученных из глобального атмосферного реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) последнего поколения ERA5<sup>3</sup>. Этот продукт имеет достаточно высокое пространственное ( $1/4^\circ$ ) и временное (1 ч) разрешение, что может быть весьма важно для воспроизведения короткопериодных (внутрисуточных) процессов и дневного хода. Отмеченные метеопараметры с исходной дискретностью по времени использовались для расчета суммарных потоков тепла, массы и напряжения трения ветра посредством балк-формул протокола *Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (CORE)*.

---

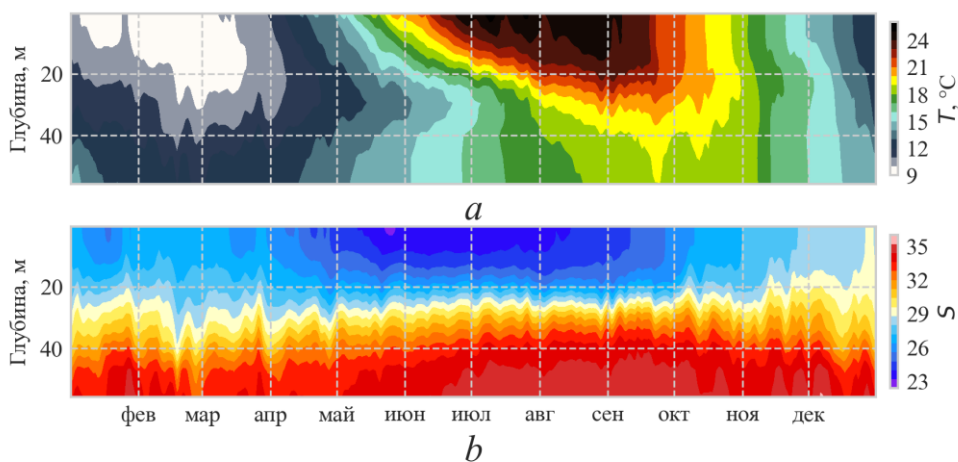
<sup>2</sup> Fofonoff N. P., Millard Jr, R. C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. Paris, France : UNESCO, 1983. 53 p. (UNESCO Technical Papers in Marine Sciences ; vol. 44). <https://doi.org/10.25607/OBP-1450>

<sup>3</sup> ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate // Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS) : site. 2017. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (date of access: 22.08.2018).



В настоящей работе не ставилась цель полного учета процесса ледообразования в зимний период. Для воспроизведения адекватных значений температуры на северо-западном шельфе Черного моря и в Азовском море использовалась коррекция потока тепла: при достижении температуры замерзания на поверхности ставится условие отсутствия потока тепла, что формально позволяет не описывать формирование ледяных полей.

Для бассейна Мраморного моря западнее о. Мармара (приблизительно вдоль  $27,38^\circ$  в. д.) задаются условия на открытой жидкой границе. Граничные условия для температуры и солёности, уровня и скоростей течений были получены на основе ежесуточных продуктов Службы мониторинга состояния морской среды проекта Коперник (*Copernicus Marine Environment Monitoring System, CMEMS*)<sup>4</sup>. Для этого по данным анализа за 2007–2016 гг. были получены среднемноголетние климатические значения (рис. 2). Отметим, что в температуре ярко выражен период зимнего выхолаживания, а также прогрев в весенний период и формирование летнего термоклина (рис. 2, *a*).



**Рис. 2.** Внутригодовая изменчивость температуры (*a*) и солёности (*b*) Мраморного моря, осредненных вдоль  $27,38^\circ$  в. д., по данным *CMEMS*<sup>4</sup> за 2007–2016 гг.

**Fig. 2.** Intra-annual variability of temperature (*a*) and salinity (*b*) in the Marmara Sea averaged along  $27.38^\circ$  E based on the *CMEMS* products<sup>4</sup> for 2007–2016

Поля солёности по данным *CMEMS* демонстрируют типичную вертикальную халинную структуру вод в бассейне Мраморного моря, где солёность верхнего слоя определяется притоком и последующей трансформацией менее солёных черноморских водных масс. Глубже солёность значительно выше за счет поступления средиземноморских вод: перепад солёности глубинных и поверхностных вод превышает 12 (рис. 2, *b*).

<sup>4</sup> Global Ocean 1/12° Physics Analysis And Forecast Updated Daily. 2018. URL: [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_ANALYSIS\\_FORECAST\\_PHY\\_001\\_02](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_02) (date of access: 22.08.2018).

Кроме граничных условий результаты глобального анализа *CMEMS* были использованы также для задания начальных условий полей. Для инициализации модели в Черном и Азовском морях была использована процедура комбинации различных источников, изложенная в работе [9]. Температура и соленость для Азовского моря построены посредством оптимальной интерполяции наблюдений *in situ*. В качестве начальных для бассейна Черного моря использованы поля температуры и солености из реанализа гидрофизических параметров Центра морских прогнозов Черного моря [10]. Кроме того, чтобы получить начальные поля на 15 августа 2007 г., был проведен адаптационный расчет по методике, предложенной А. С. Саркисяном. Исходное разрешение подготовленных полей составляло  $1/24^\circ$ , поскольку первоначально они готовились для долгосрочных численных экспериментов с грубым разрешением. Далее массивы были проинтерполированы на сетку новой конфигурации и выполнен предварительный прогностический расчет общей циркуляции каскада за период 15 августа – 31 декабря 2007 г. для адаптации модели к высокому разрешению. Ранее в численных экспериментах было показано, что она происходит в течение около четырех месяцев [11].

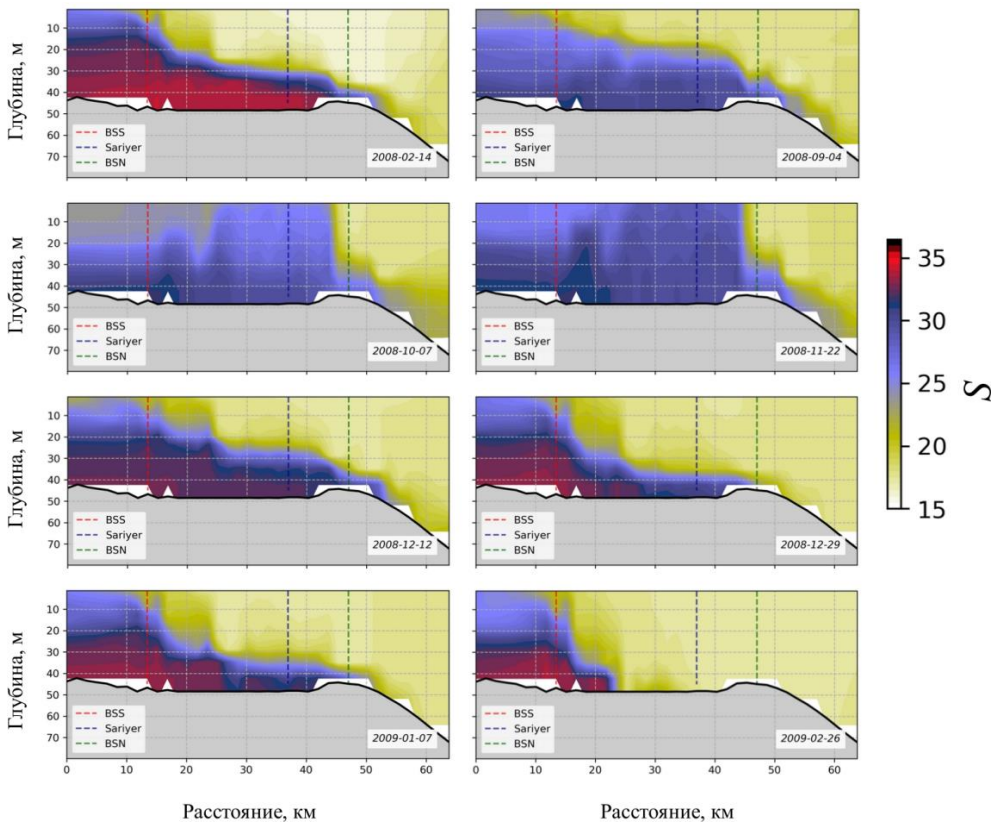
Основной численный эксперимент с использованием разработанной конфигурации был проведен за период 1 января 2008 г. – 31 декабря 2009 г. Результаты настоящей работы по времени соответствуют расчету из работы [2]. Это дает возможность провести их сопоставление, чтобы оценить качество моделирования пролива в его схематизированном представлении. Кроме того, период численного эксперимента частично совпал с временем проведения измерений из работы [6], которые также будут использованы для сопоставления. Положение станции *M7* из указанной работы отмечено на рис. 1, *b*.

### Анализ результатов

Несмотря на все неточности при воспроизведении конфигурации пролива (рис. 1, *b*), модель дает весьма правдоподобное распределение гидрологических характеристик вдоль оси пролива. В термохалинных полях отчетливо выделяются два слоя однородных водных масс, разделенных тонким слоем высоких градиентов. Это хорошо выражено на вертикальных разрезах солености вдоль пролива (рис. 3, фрагмент от 14.02.2008). Положение станций, вдоль которых построены разрезы, показано на рис. 1, *b*.

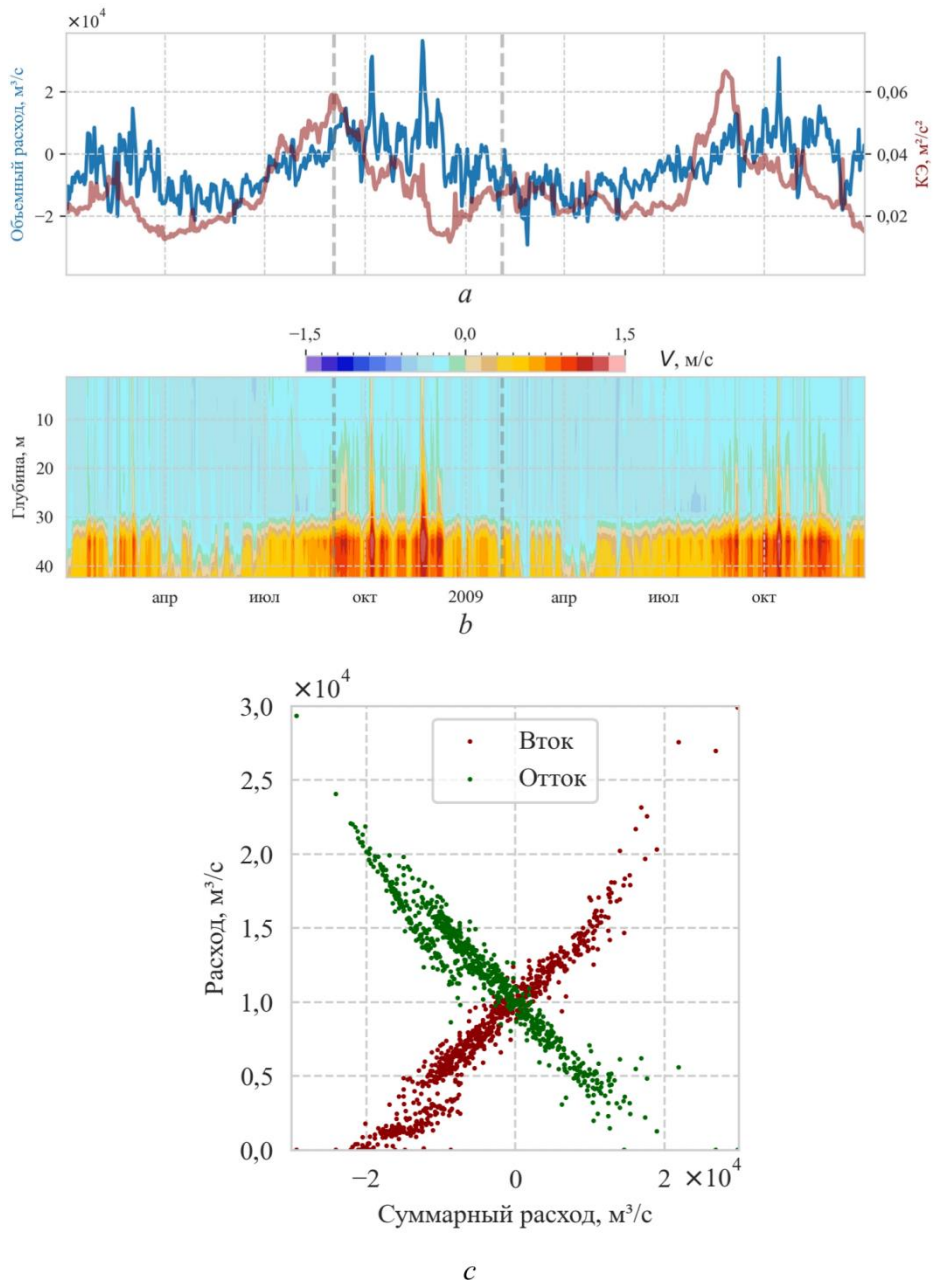
Отметим, что в расчете воспроизводится сезонный ход общего транспорта через Босфор (рис. 4, *a*), обусловленный главным образом интенсификацией речного стока в Черном море в мае – июне [12]. Соотношение расходов верхне- и нижнебосфорского течений соответствует диаграммам из работы [2] (рис. 4, *c*).

Течения в проливе также имеют двухслойную структуру (рис. 3 и 4, *b*). В верхнем слое течения направлены из Черного моря в Мраморное. Этот слой заполнен водами Черного моря, которые постепенно трансформируются по мере переноса вдоль пролива. Течение в нижнем слое направлено в сторону Черного моря. Здесь содержится вода Мраморного моря, также трансформирующаяся по мере движения. Изменения меридиональной скорости со временем демонстрируют, однако, наличие периодов блокировки верхнебосфорского или нижнебосфорского течения в проливе (рис. 4, *a, b*).



**Р и с. 3.** Распределение солёности морской воды вдоль пролива Босфор в отдельные даты 2008–2009 гг.

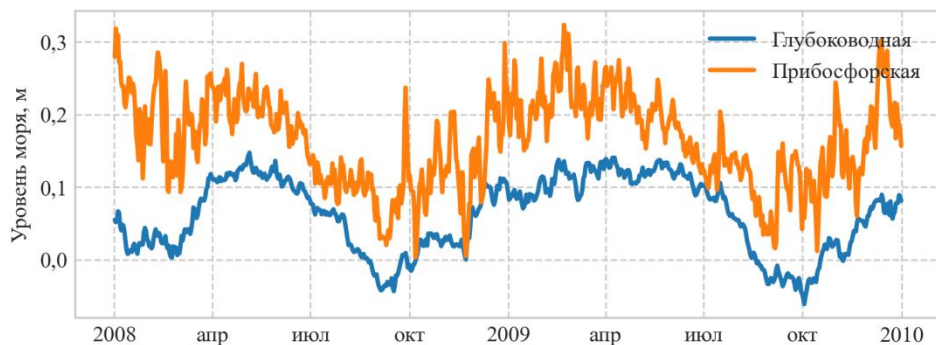
**F i g. 3.** Distribution of seawater salinity along the Bosphorus Strait on certain dates in 2008–2009



**Р и с. 4.** Динамика вод в проливе Босфор: *a* – средняя кинетическая энергия (КЭ) поверхностных течений в Мраморном море и суммарный баротропный меридиональный транспорт в окрестности точки *BSN*; *b* – меридиональные течения в северной части (*BSN*); *c* – значения втока и оттока как функции значений суммарного транспорта. Вертикальными штриховыми линиями показан период проведения наблюдений из работы [6]

**F i g. 4.** Water dynamics in the Bosphorus Strait: *a* – mean kinetic energy (CE) of surface currents in the Marmara Sea and total barotropic meridional transport in the vicinity of point *BSN*; *b* – meridional currents in the northern part (*BSN*); *c* – inflow and outflow values as the functions of total transport. Vertical dashed lines indicate the period of observations from [6]

Наши расчеты подтверждают также установленный в работе [2] механизм поддержания верхнебосфорского течения в зимний период. Он определяется подъемом уровня Черного моря в прибосфорском районе, обусловленным интенсификацией в это время Основного Черноморского течения (ОЧТ) (рис. 5).



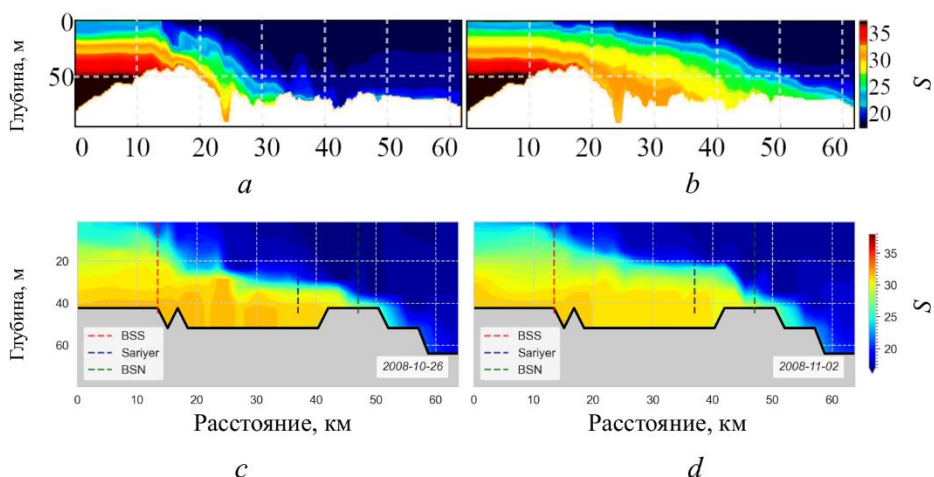
**Рис. 5.** Уровень Черного моря, осредненный по глубоководной (для глубин более 500 м) и прибосфорской акваториям

**Fig. 5.** The Black Sea surface level averaged over the deep-sea (deeper than 500 m) and near-Bosphorus areas

Сезонному ходу в нашем расчете подвержена также соленость нижнего слоя. В зимний период соленость может достигать 30–35 (рис. 3). При этом высокосоленая вода доходит по дну до порога на выходе из Босфора. Как правило, граница раздела слоев расширяется и поднимается к поверхности при подходе к Мраморному морю (рис. 3). В отдельные промежутки времени соленость у дна падает до 25–30 (рис. 3, фрагмент от 09.04.2008).

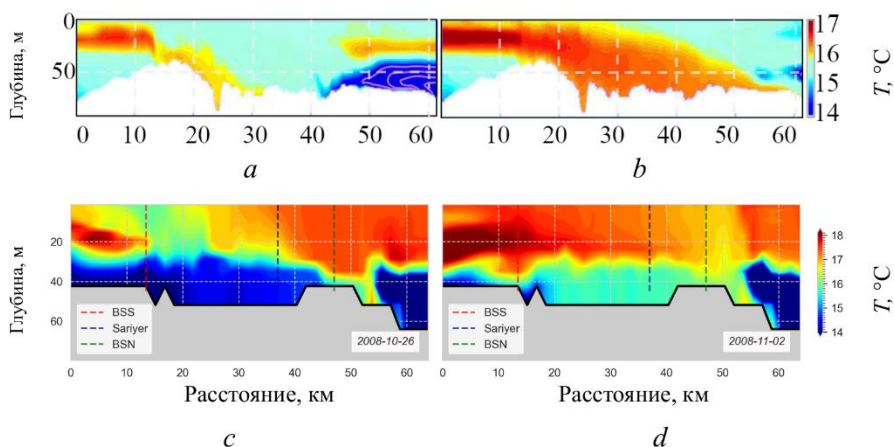
Как сезонная, так и высокочастотная изменчивость солености в нижнем слое пролива обусловлены особенностью вертикального строения солености в Мраморном море. В силу поступления более пресных черноморских вод в верхние слои бассейна и высокосоленых вод Эгейского моря в его нижние слои в Мраморном море формируется почти двухслойная стратификация. Колебания положения границы раздела между слоями в районе устья Босфора в Мраморном море определяют изменения солености в нижнем слое пролива.

Для сопоставления с результатами работы [2] рассмотрим разрезы солености вдоль пролива на 26 октября и 2 ноября 2008 г. (рис. 6). Для октября наш расчет показывает несколько более протяженное распространение вод Мраморного моря на север по сравнению с расчетом из работы [2]. Тем не менее в нашем расчете так же, как и в указанной работе, наблюдается блокирование черноморских вод на границе с Мраморным морем. В обоих расчетах видна тенденция подъема границы раздела в период с октября по ноябрь. Придонные воды в наших результатах оказались более холодными (рис. 7). В температуре хуже проявляется процесс вовлечения более соленых, но при этом более теплых мраморноморских вод в бассейн Черного моря.



**Р и с. 6.** Распределение солёности вдоль пролива 26 октября и 2 ноября 2008 г. по расчетам из работы [2] (*a, b*) и настоящей работы (*c, d*)

**F i g. 6.** Distribution of seawater salinity along the strait on 26.10.2008 and 02.11.2008 based on simulations in [2] (*a, b*) and in this paper (*c, d*)

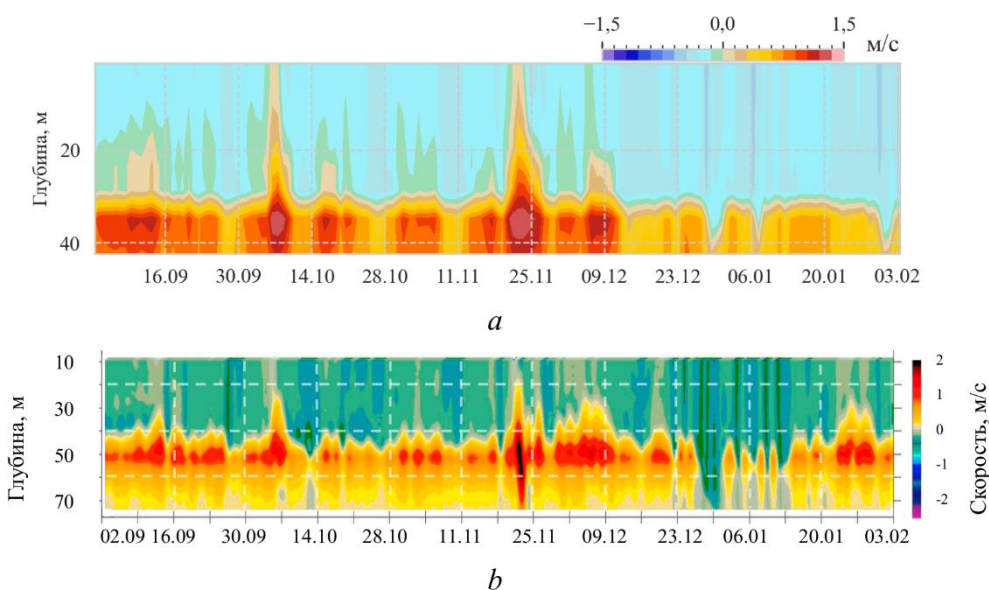


**Р и с. 7.** Распределение температуры (°C) вдоль пролива 26 октября и 2 ноября 2008 г. по расчетам из работы [2] (*a, b*) и настоящей работы (*c, d*)

**F i g. 7.** Distribution of seawater temperature (°C) along the strait on 26.10.2008 and 02.11.2008 based on simulations in [2] (*a, b*) and in this paper (*c, d*)

Граница раздела слоев значительно колеблется во времени. Иногда она поднимается к свободной поверхности и верхнебосфорское течение полностью блокируется (рис. 3, фрагмент от 26.02.2009). В работе [6] показано, что такие события связаны с воздействием ветра. В ней на основе непосредственных наблюдений скорости течений выделены периоды времени, когда верхнебосфорское течение полностью блокировалось. Их сопоставление с результатами настоящей работы (рис. 8) демонстрирует неплохое соответствие: в период проведения наблюдений согласуются события блокировки верхне-

и нижнебосфорского течений. При этом отметим, что положение границы раздела этих течений заметно отличается вследствие несоответствия модельной глубины реальной для данной станции.



**Р и с. 8.** Сравнение с данными наблюдений: меридиональные течения (м/с) в северной части пролива в период 9 сентября 2008 г. – 3 февраля 2009 г. по результатам моделирования (а) и измерениям из работы [6] (b)  
**Fig. 8.** Comparison with observational data: meridional currents (m/s) in the northern part of the strait in the period September 9, 2008 – February 3, 2009 based on the results of simulation (a) and measurements from [6] (b)

Примерно 7 октября и 22 ноября 2008 г. блокировка верхнебосфорского течения наблюдалась как на южной, так и на северной оконечности пролива, где были выставлены буи с измерителями течений [6]. В анализируемых результатах в эти дни воды Мраморного моря занимают пролив Босфор по всей его глубине – от южного устья и почти до северной оконечности (рис. 3, фрагменты от 7 октября и 22 ноября 2008 г.). Кроме того, из наблюдений, приведенных в [6], следует, что с сентября 2008 г. по февраль 2009 г. наблюдалось еще три случая блокировки верхнебосфорского течения у южной оконечности пролива. В то же время на севере пролива в эти дни, как обычно, в верхнем слое наблюдался перенос черноморских вод в направлении Мраморного моря. Согласно нашему расчету, в эти дни в районе южной оконечности пролива также наблюдается либо исчезновение верхнего слоя, либо существенное уменьшение его толщины.

Наблюдения, приведенные в [6], показали также, что в районе северной оконечности пролива с конца декабря 2008 г. по середину января 2009 г. наблюдалось несколько случаев блокировки нижнебосфорского течения. Согласно работе [6], полная блокировка переноса в направлении Черного моря наблюдалась в конце декабря (рис. 8). Разрезы солености вдоль пролива

(рис. 3) показывают, что в это время нижнебосфорское течение полностью блокируется на его северной оконечности.

Примерно между 5 и 14 января 2009 г. нижнебосфорское течение на севере пролива, согласно работе [6], блокируется почти до дна (рис. 8). В нашем расчете в эти дни нижний слой не исчезает полностью, но его толщина существенно уменьшается. Вместе с тем в расчетах наблюдается и полная блокировка нижнебосфорского течения почти по всей длине пролива (рис. 3, фрагмент от 26.02.2009).

В целом анализ меридиональных течений в проливе за два года демонстрирует, что блокировки верхнебосфорского течения происходят начиная с сентября (рис. 4, *b*), что, по-видимому, вызвано интенсификацией течений в Мраморном море к этому времени (рис. 4, *a*), обусловленной ветровым воздействием. При этом далее, как видно из рис. 5, происходит ослабление ОЧТ. При ослаблении мраморноморской циркуляции можно наблюдать явления блокировки нижнебосфорского течения.

### Обсуждение

Анализ меридиональных течений в проливе демонстрирует, что блокировки верхнебосфорского течения происходят начиная с сентября, что может быть вызвано интенсификацией обусловленных ветровым воздействием течений в Мраморном море и последующим ослаблением ОЧТ. Это приводит к поступлению соленых мраморноморских вод в бассейн Черного моря и формированию в нем линз соленой воды, воспроизведенных в представленном численном эксперименте [5]. Это также может быть объяснением интрузий соленой воды, выявленных в этот период по измерениям буев-профилемеров [1]. При ослаблении мраморноморской циркуляции в зимне-весенний период можно наблюдать обратные явления, при которых возникают события блокировки нижнебосфорского течения.

### Выводы

Приведенное в настоящей работе сопоставление гидрофизических полей в проливе Босфор с наблюдениями показывает, что предложенная модель весьма неплохо воспроизводит ситуации блокировки верхнебосфорского или нижнебосфорского течения по сравнению с конечно-элементными моделями, позволяющими учитывать более сложную конфигурацию пролива. При этом соотношения расходов верхне- и нижнебосфорского течений, полученные на основе конечно-элементных моделей и по результатам нашего численного эксперимента, количественно согласуются. Подтвержден механизм поддержания верхнебосфорского течения в зимний период. Он определяется подъемом уровня Черного моря в прибосфорском районе, обусловленным интенсификацией ОЧТ.

Основываясь на результатах такой калибровки предлагаемой региональной конфигурации модели *NEMO*<sub>2</sub> можно полагать, что она качественно верно описывает реакцию пролива на изменения как ветрового воздействия, так и плотности морской воды в окрестности северного и южного входов в пролив.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea / A. Falina [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 4. P. 3141–3151. <https://doi.org/10.1002/2017JC012729>
2. *Stanev E. V., Grashorn S., Zhang Y. J.* Cascading ocean basins: numerical simulations of the circulation and interbasin exchange in the Azov-Black-Marmara-Mediterranean Seas system // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67. P. 1003–1025. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1071-2>
3. *Демьшев С. Г., Довгая С. В.* Численное моделирование циркуляции Мраморного моря в 2008 году с учетом ветра и водообмена через проливы Босфор и Дарданеллы // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 1. С. 68–78. EDN RGDFTA.
4. NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. France : IPSL, 2015. 391 p. (Notes du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>
5. *Мизюк А. И., Коротаев Г. К.* Черноморские внутритропикноклинные линзы по результатам численного моделирования циркуляции бассейна // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 1. С. 112–122. EDN MHXSSO. <https://doi.org/10.31857/S0002351520010101>
6. On flow variability in the Bosphorus Strait / E. Jarosz [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C8. C08038. <https://doi.org/10.1029/2010JC006861>
7. *Leclair M., Madec G.* A conservative leapfrog time stepping method // *Ocean Modelling*. 2009. Vol. 30, iss. 2–3. P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.06.006>
8. *Rodi W.* Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C5. P. 5305–5328. <https://doi.org/10.1029/JC092iC05p05305>
9. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели / А. И. Мизюк [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 496–510. EDN XHZXAR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-496-510>
10. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря / Г. К. Коротаев [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 5. С. 609–617. EDN WORWIV. <https://doi.org/10.7868/S0002351516050072>
11. Особенности горизонтальной изменчивости температуры поверхности в западной части Черного моря по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением / А. И. Мизюк [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 5. С. 639–648. EDN WORWNB. <https://doi.org/10.7868/S0002351516050102>
12. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб. : Гидрометеоздат, 1991. 428 с.

*Об авторах:*


**Мизюк Артем Игоревич**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8285-8260**, **ORCID ID: 0000-0003-4885-354X**, **ResearcherID: C-6125-2016**, [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

**Коротаев Геннадий Константинович**, научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **SPIN-код: 9861-2241**, **ResearcherID: K-3408-2017**, **Scopus Author ID: 7004998153**, [gkorotaev@gmail.com](mailto:gkorotaev@gmail.com)

Научная статья

УДК 504.3.054  
EDN: WUXIXB

## Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета

А. С. Папкина, Е. Б. Шибанов , Д. В. Калинин*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
 *e-shibanov@mail.ru*Поступила в редакцию 01.04.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024;  
принята к публикации 17.07.2024.

### Аннотация

*Цель.* Оценены величины ошибки атмосферной коррекции спутниковых данных *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, *VIIRS-SNPP*, *VIIRS-JPSS*, *NASA HawkEye (SeaHawk)* и *OLCI-Sentinel-3A* за период 28–29 июля 2021 г., когда был зарегистрирован перенос пыли над Черноморским регионом.

*Методы и результаты.* Для оценки масштабов и интенсивности исследуемого интенсивного пылевого переноса проведен анализ результатов натуральных фотометрических измерений и спутниковых данных. Натурные данные измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) были получены на западных черноморских станциях *Galata Platform* и *Section 7* сети *AERONET (AErosol RObotic NETwork)*. Для анализа изменчивости величин спектрального коэффициента яркости моря за исследуемый период использовались данные дополнения *AERONET – Ocean Color (AERONET-OC)*. В качестве спутниковых данных были использованы измерения сканеров цвета, представленные в базе данных *Ocean Color (MODIS Aqua/Terra, VIIRS SNPP/JPSS, HawkEye и OLCI)*.

*Выводы.* В результате аппроксимации ошибок атмосферной коррекции спутниковых данных за 28.07.2021 были получены степенные зависимости, близкие к  $\lambda^{-5}$ . Это объясняется суммарным вкладом молекулярной составляющей ( $\lambda^{-4}$ ) и аэрозольного поглощения ( $\lambda^{-1}$ ). За 29.07.2021 наблюдается более ярко выраженная степенная зависимость функции, так как концентрация пылевого аэрозоля в этот день возрастает, а вклад аэрозольного поглощения становится близок к степенной зависимости  $\lambda^{-2}$ . Также за 29.07.2021 над исследуемым регионом по спутниковым данным *CALIPSO* было показано присутствие не только пылевого, но и дымового аэрозоля. По данным моделирования обратных траекторий воздушных потоков *HYSPLIT* показано, что аэрозольные массы в этот день двигались в направлении Черного моря со стороны юго-запада (острова Крит), что дополнительно подтверждается высокими значениями АОТ над восточной частью акватории Средиземного моря за 29.07.2021. Предполагается, что комбинация двух поглощающих типов аэрозолей вызвала еще большие неточности определения спектрального коэффициента яркости моря за исследуемый период.

**Ключевые слова:** *MODIS, VIIRS, HawkEye, Sentinel, SPM, AERONET, CALIPSO*, обратные траектории *HYSPLIT*, пылевой аэрозоль, аэрозоль дыма, спектральный коэффициент яркости моря, аэрозольная оптическая толщина, АОТ, поглощение, Черное море, атмосферный аэрозоль, спутниковый мониторинг, наземный мониторинг, оптические характеристики

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрхимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использо-


ванием данных дистанционных и контактных методов измерений. Авторы благодарят Тома Кучера (*Tom Kucsera*), Брента Холбена (*Brent Holben*), Джузеппе Зиборди (*Giuseppe Zibordi*) и группу Жене Фельдмана (*Gene Feldman*) из *NASA* за предоставление данных АОТ, расчеты данных *BTA*, обработку результатов измерений, полученных на севастопольской станции *AERONET*, и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений.

**Для цитирования:** Папкина А. С., Шибанов Е. Б., Калинин Д. В. Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 766–781. EDN WUXIXB.

Original article

## The Effect of Dust Aerosol on Satellite Data from Different Color Scanners

A. S. Papkova, E. B. Shybanov , D. V. Kalinskaya

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

### Abstract

**Purpose.** The work is purposed at evaluating the errors in atmospheric correction of the satellite (*MODIS Aqua*, *MODIS Terra*, *VIIRS SNPP*, *VIIRS JPSS*, *NASA HawkEye (SeaHawk)* and *OLCI (Sentinel-3A)*) data for July 28–29, 2021 when a dust transport over the Black Sea region was recorded.

**Methods and Results.** To assess the scale and intensity of the studied dust transfer, the results of *in situ* photometric measurements and satellite data were analyzed. The *in situ* measurement data on aerosol optical depth (AOD) were obtained at the western Black Sea stations *Galata\_Platform* and *Section\_7* of the *AERONET* network (*AErosol RObotic NETwork*). The variability of sea remote sensing reflectance values during the period under study was analyzed using the additional *AERONET – Ocean Color (AERONET-OC)* data. The color scanner (*MODIS Aqua/Terra*, *VIIRS SNPP/JPSS*, *HawkEye* and *OLCI*) measurements presented in the *Ocean Color* database were used as satellite data.

**Conclusions.** The approximation of errors in the atmospheric correction of satellite data for July 28–29, 2021 has resulted in obtaining the power-law dependencies close to  $\lambda^{-5}$ . This is explained by the total contribution of molecular component ( $\lambda^{-4}$ ) and aerosol absorption ( $\lambda^{-1}$ ). On July 29, 2021, a better pronounced power function is observed since the dust aerosol concentration increases on this day, whereas the contribution of aerosol absorption becomes close to the power dependence  $\lambda^{-2}$ . Also on the same day, the *CALIPSO* satellite data showed the presence of not only dust aerosol, but also the biomass burning over the region under study. Modeling the back trajectories of *HYSPLIT* air flows has shown that just on this day the aerosol masses moved towards the Black Sea from the southwest (Crete Island), that was additionally confirmed by high AOD values over the eastern Mediterranean Sea on July 29, 2021. The combination of two types of absorbing aerosols is assumed to induce even larger inaccuracies in determining the sea remote sensing reflectance for the period under study.

**Keywords:** *MODIS*, *VIIRS*, *HawkEye*, *Sentinel*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, *HYSPLIT* back trajectories, dust aerosol, biomass burning, sea remote sensing reflectance, aerosol optical depth, AOD, absorption, Black Sea, atmospheric aerosol, satellite monitoring, ground monitoring, optical characteristics

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 on theme “Analysis, hindcast and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on numerical modeling using the data of remote and contact measurement methods”. The authors are thankful to Tom Kucsera, Brent Holben, Giuseppe Zibordi, as well as to the group of Gene Feldman from *NASA* for providing the AOD data, calculating the *BTA* data, processing the measurement results obtained at the Sevastopol *AERONET* station, and for the possibility of using high-quality photometric measurement data.

**For citation:** Papkova, A.S., Shybanov, E.B. and Kalinskaya, D.V., 2024. The Effect of Dust Aerosol on Satellite Data from Different Color Scanners. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 720-735.

## Введение

При анализе антропогенных изменений климата часто пренебрегают минеральной пылью, рассматривая ее как часть естественного аэрозоля. Некоторые исследователи считают, что пыль может быть важным климатообразующим компонентом, особенно над определенными океаническими областями и регионами, где ее концентрации высоки [1, 2]. Несмотря на то что невозможно точно определить влияние минеральной пыли на глобальный климат, исследования по данной теме являются междисциплинарными и актуальными. Полную информацию о свойствах различных типов аэрозоля (включая поглощающий аэрозоль) можно получить при комплексном определении его концентрации, микроструктуры, химического состава, а также оптических характеристик [3–5].

Данное исследование является продолжением цикла работ, посвященных изучению оптических свойств пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря и его влияния на продукты *Ocean Color*. Для исследуемого региона при анализе спутниковых данных во многих случаях получаемые результаты могут иметь большие ошибки вследствие некорректного учета оптических свойств аэрозоля [6–9]. Стоит отметить, что ежегодно над Черноморским регионом наблюдаются пылевые переносы как со стороны Африканского континента, так и со стороны Ближнего Востока, Азии [10]. Поскольку изучение данной темы учеными МГИ РАН проводится более 10 лет, на данный момент уже существует определенная методика идентификации различных типов аэрозолей (фоновый аэрозоль, дым, пыль), основанная на анализе изменчивости оптических характеристик, таких как аэрозольная оптическая толщина (АОТ), параметр Ангстрема ( $\alpha$ ), альбеда однократного рассеивания (*SSA*), размерное распределение и концентрация аэрозольных частиц (мелкодисперсные (*PM<sub>2,5</sub>*) и крупнодисперсные (*PM<sub>10</sub>*) частицы), параметр асимметрии и т. д. Метод идентификации пылевого аэрозоля сочетает в себе визуальный анализ спутниковых снимков, на которых хорошо виден шлейф пыли, и анализ натурных фотометрических измерений аэрозольных оптических характеристик. Для анализа аэрозоля над Черноморским регионом используются данные станций сети *AERONET (Galata Platform, Section 7)*, расположенные в западной части Черного моря, а также уникальные данные портативного спектрофотометра *SPM* и пылемера *ATMAC*, измерения которыми проводились ежедневно на территории МГИ РАН [11–13].

Стоит отметить, что пылевой аэрозоль имеет наибольшее влияние не только на изменчивость оптических характеристик атмосферы, но и на спутниковые продукты *Ocean Color*. Для объективной оценки состояния акваторий и процедуры атмосферной коррекции на основе данных дистанционного зондирования необходимо провести сравнительный анализ трех видов данных измерений: спутниковых, модельных и натурных. В работах [8, 14–28] показано, что при наличии пыли спектральный коэффициент яркости моря может иметь отрицательные значения в коротковолновой области (400–443 нм). Этот факт указывает на систематические ошибки в работе стандартных алгоритмов атмосферной коррекции, построенных на принципе экстраполяции свойств аэрозоля от ближней ИК области спектра в видимую его часть [27]. Ранее в работе [18] было аналитически доказано, что при наличии в атмосфере над регионом пылевого

поглощающего аэрозоля погрешность атмосферной коррекции выражается степенной функцией четвертой степени, т. е. близка к  $\lambda^{-4}$ . Это связано с поглощением излучения, рассеянного молекулами воздуха, аэрозолем. Аналитическое выражение, описывающее зависимость величины ошибки стандартной атмосферной коррекции от стратификации аэрозоля при малых величинах оптической толщины поглощения света аэрозолем  $a_0(\lambda)$ , имеет вид

$$r = \frac{p_m(\cos \gamma) \cdot \tau_m^0(\lambda)}{4\mu_0\mu} a_0(\lambda) \cdot \left( \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right) \int_0^1 \int_0^p g(x) dx \cdot dp, \quad (1)$$

$$a_0(\lambda) = (1 - \Lambda) \tau_a^0,$$

где  $\tau_a^0$  – аэрозольная оптическая толщина;  $\Lambda$  – альбеда однократного рассеивания;  $\mu_0$  – косинус зенитного угла Солнца;  $\mu$  – косинус зенитного угла наблюдения;  $\cos \gamma = -\mu_1 \cdot \mu_2 + \sqrt{1 - \mu_1^2} \sqrt{1 - \mu_2^2} \cos \varphi$  – косинус угла рассеяния;  $\tau_m^0$  – общая оптическая толщина молекулярной атмосферы;  $g(x)$  – функция стратификации пылевого аэрозоля, показывающая зависимость относительной концентрации аэрозольных частиц от атмосферного давления на заданной высоте. Первая дробь в выражении (1) есть не что иное, как выражение для коэффициента яркости молекулярной атмосферы в линейном приближении Гордона. Следовательно, можно выделить три фактора, влияющие на величину ошибки атмосферной коррекции. Множитель  $\frac{p_m(\cos \gamma)}{\mu_0\mu} \left( \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right)$  описывает

геометрию наблюдения, а двойной интеграл не зависит от длины волны и учитывает стратификацию поглощающего аэрозоля относительно молекул воздуха. Поэтому спектральные свойства ошибки атмосферной коррекции описываются множителями  $\tau_m^0(\lambda)$  и  $a_0$ . Известно, что по закону Рэлея  $\tau_m^0 \approx \lambda^{-4}$ . Спектральные свойства аэрозольного поглощения определяются микрофизикой аэрозоля, которая для пылевого аэрозоля зависит от источников пыли и от процессов ее трансформации в атмосфере. До настоящего момента оценка изменчивости спектральной зависимости  $a_0$  не была проведена. В данной работе впервые предлагается оценить спектральный ход поглощающих свойств пылевого аэрозоля для случая переноса пыли над Черноморским регионом.

Экспериментальные закономерности ошибки атмосферной коррекции анализировались в [18]. Было показано, что наибольшая разница между спутниковыми и натурными измерениями коэффициента яркости моря регистрируется в случае наличия в атмосфере пылевого аэрозоля. Для отобранных 49 данных, полученных в дни пылевых переносов, был использован метод главных компонент с оценкой вклада первого вектора. В результате было показано, что 86 % дисперсии ошибки валидации *MODIS-Aqua* объясняются первым собственным вектором, который хорошо аппроксимируется степенным законом  $\lambda^{-3,57 \pm 0,32}$ . Тем самым подтвердилась достоверность аналитических оценок [18].

Целью данного исследования является оценка величины ошибки атмосферной коррекции спутниковых данных *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, *VIIRS-SNPP*, *VIIRS-JPSS*, *NASA HawkEye (SeaHawk)* и *OLCI-Sentinel-3A* за период 28–29 июля 2021 г., когда был зарегистрирован перенос пыли над Черноморским регионом.

Основной этап исследования состоит из анализа изменчивости оптических характеристик атмосферы в период с 28 по 29 июля 2021 г. над Черноморским регионом и доказательства (по спутниковым и модельным данным) того, что за исследуемый период над регионом регистрируется именно пылевой аэрозоль.

Второй этап посвящен оценке влияния поглощающего пылевого аэрозоля на величину ошибки атмосферной коррекции при вычислении спектрального коэффициента яркости за 28 и 29 июля 2021 г. Именно за эти даты было получено наибольшее количество различных спутниковых измерений, синхронизированных с натурными измерениями спектрального коэффициента яркости моря по данным сети *AERONET – Ocean Color (AERONET-OC)*. В данном исследовании проведен расчет величины ошибки валидации для *MODIS-Aqua/Terra*, *VIIRS-JPSS*, *Sentinel-3A* и *HawkEye (SeaHawk)*.

### Приборы и материалы

В качестве источника натуральных измерений аэрозольной оптической толщины использовались фотометрические данные международной сети *AERONET (Aerosol ROboties NETwork)*. Для анализа данных о спектральном коэффициенте яркости моря использовались данные дополнения сети *AERONET-OC*, которое дает возможность измерения выходящего из-под воды излучения [29]. На данный момент две черноморские станции *Section\_7* (29,45° в. д., 44,45° с. ш.) и *Galata\_Platform* (28,19° в. д., 43,05° с. ш.) предоставляют информацию о цвете морской воды. В данной работе был проанализирован массив среднесуточных данных нормализованного излучения воды  $L_{WN}$  уровня 2 (более высокого качества). Массив данных уровня 1.5 отбирают с учетом облачности с использованием серии тестов качества, а массив данных уровня 2 состоит из полностью очищенных данных, полученных после калибровки и проверки программного обеспечения. В ходе исследований значения  $L_{WN}(\lambda)$  были пересчитаны в значения  $R_{rs}(\lambda)$  путем деления на солнечную постоянную  $F_0(\lambda)$  [30].

Чтобы сопоставить спутниковые и натурные измерения за период 28–29 июля 2021 г. для корректировки неточностей, вызванных изменчивостью и аномалиями атмосферных параметров, были отобраны данные международной сети фотометров *AERONET*, находящиеся в свободном доступе на сайте <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, и данные *MODIS-Aqua/Terra*, *VIIRS-SNPP/JPSS*, *HawkEye* и *OLCI*, находящиеся в свободном доступе на сайте <https://OceanColor.gsfc.nasa.gov>. Данные оптических характеристик *MODIS* – это результат комбинации измерений со спутников *Terra* и *Aqua*, информация с которых предоставляется в близком к реальному времени. При этом разрешение сенсора *MODIS* – 0,5°, разрешение снимков – 2 км, временное разрешение – точное.

Осложняющим фактором в исследовании является то, что длины волн, на которых предоставляются результаты измерений, полученные на станциях *AERONET-OC*, не полностью совпадают с каналами, измеряемыми спутниками, особенно в видимой области диапазона. Так, измерительные каналы *MODIS-Aqua/Terra* имеют длины волн 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 667 и 678 нм; *VIIRS-JPSS* – длины волн 411, 445, 489, 556 и 667 нм. Для *HawkEye Rrs(λ)* измеряются на длинах волн 412, 488, 510, 556 и 670 нм. Проблема интерполяции величин коэффициента яркости, полученных на каналах фотометра *CIMEL-318*, в каналы спутника возникает вследствие сложной формы спектра поглощения морской воды. Рассеяние также влияет на форму  $R_{rs}(\lambda)$ . Однако соответствующие спектральные зависимости монотонные и более плавные, что позволяет применить полином второй степени при интерполяции. В спектре поглощения особое внимание уделяют поглощению чистой морской воды, так как она сильно влияет на изменчивость значений  $R_{rs}(\lambda)$  в длинноволновой области спектра. Спектр поглощения чистой морской воды вносит наибольшие ошибки при интерполяции.

В данном исследовании был применен метод, заключающийся в умножении коэффициента яркости, полученного по натурным измерениям, на величину модельного поглощения морской воды:

$$a_w(\lambda_i) = a_{pw}(\lambda_i) + 0,1 \cdot C_y \cdot \exp[0,015 \cdot (400 - \lambda_i)], \quad (2)$$

где величина  $C_y$  оценивается по статистической связи с индексом цвета:

$$C_y = 2,3 \cdot CI(555 / 510)^{2,18}. \quad (3)$$

Выражение (3) получено на основе регрессионных зависимостей, приведенных в [31]. После умножения натурального спектрального коэффициента яркости моря на модельное поглощение применялась интерполяция полиномом второй степени в каналы спутника. Полученные значения затем делились на величину модельного поглощения на длинах волн спутника.

Для определения преимущественного типа аэрозоля за исследуемый период были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO* – американо-французского исследовательского спутника, запущенного в рамках программы *NASA EOS (Earth Observing System)*, предназначенного для изучения облачного покрова Земли и вертикальной структуры атмосферного аэрозоля. Основным измерительным инструментом *CALIPSO* является трехканальный изображающий радиометр (8,65, 10,6 и 12,05 мкм). Типы аэрозолей определяют по величине интегрированного коэффициента обратного рассеяния и коэффициента деполяризации частиц. Типы аэрозолей, определяемые по расчетам алгоритмов *CALIPSO*: дым (от горения лесов), пыль, загрязненная пыль (смеси пыли и дыма), загрязненный континентальный и чистый континентальный аэрозоль [32]. Каждый тип аэрозоля характеризуется набором лидарных отношений на длинах волн 532 и 1064 нм [33].

Для получения информации об источнике дымового аэрозоля использовались результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс, по-

лученные с помощью программного комплекса модели *HYSPLIT*. Анализ обратных траекторий позволяет отследить перемещение воздушных потоков на разных высотах и установить местоположение вероятных источников поступления примесей в атмосферу [34].

### Результаты и обсуждение

В период с 28 по 29 июля 2021 г. по спутниковым данным над Черноморским регионом наблюдался интенсивный пылевой перенос со стороны Аравийского п-ова и Сахары. Как видно на спутниковых изображениях *VIIRS* в псевдоцветах, пылевой перенос регистрируется по обеим сторонам от области засветки, а значит, масштаб пылевого события более тысячи квадратных километров. На всех представленных спутниковых снимках также хорошо визуализируется область интенсивных пожаров на побережье Средиземного моря (территория Турции). Интенсивное поглощение, обусловленное присутствием дымового аэрозоля западнее о. Крит, подтверждается высокими значениями АОТ над восточной частью акватории Средиземного моря за 29.07.2021 (рис. 1). Следующим этапом подтверждения или опровержения события пылевого переноса над Черноморским регионом за исследуемый период был анализ обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели *HYSPLIT* [34] (рис. 1, *b, d*). Как видно из рис. 1, за все дни на высоте 3 км регистрируется пылевой перенос со стороны пустыни Сахара.

Т а б л и ц а 1

Table 1

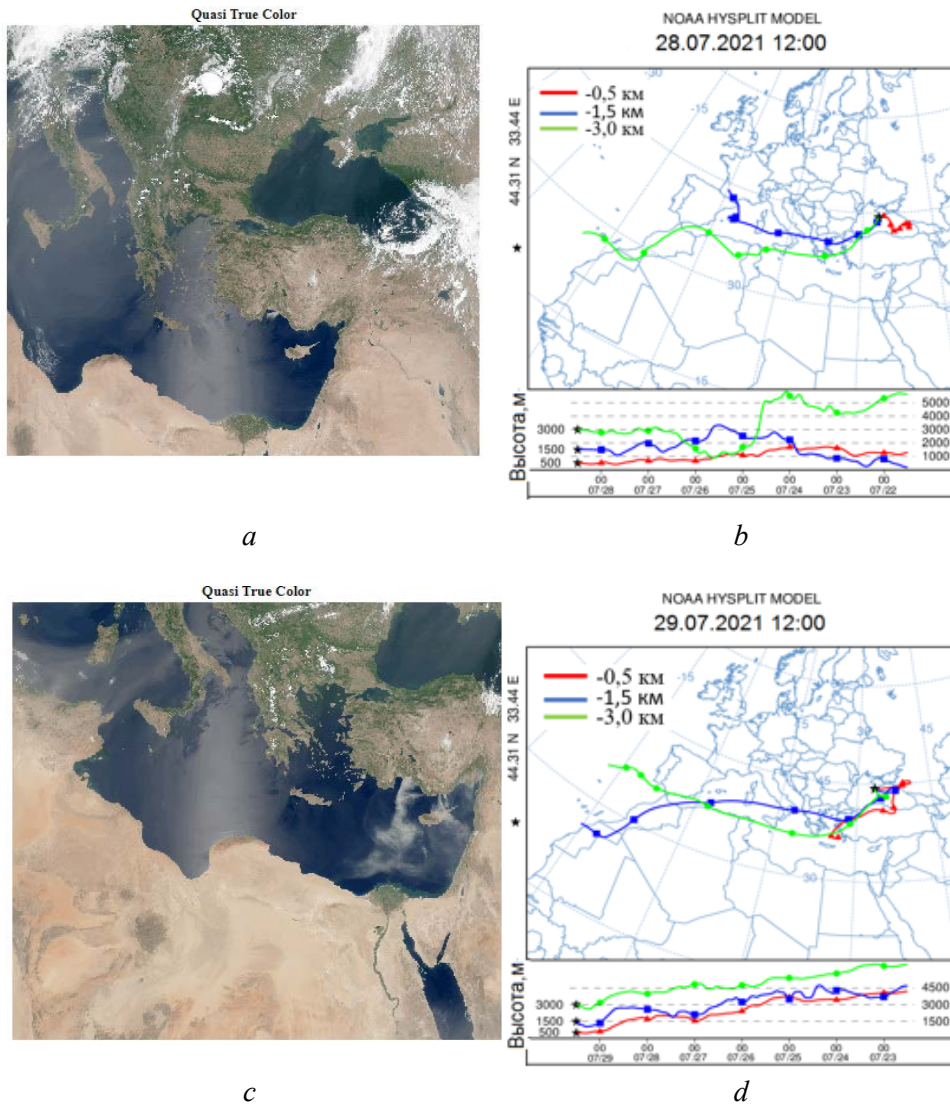
### Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над станциями *AERONET-OC* в Черном море Optical characteristics of atmospheric aerosol over the *AERONET-OC* stations in the Black Sea

Параметры аэрозоля / Aerosol parameters	<i>Section-7 Platform</i>			<i>Galata Platform</i>		
	27.07.2021	28.07.2021	29.07.2021	27.07.2021	28.07.2021	29.07.2021
AOD 1020nm	0,1044	0,1594	0,15640	0,118754	0,153976	0,145702
AOD 865nm	0,1184	0,1774	0,17599	0,133570	0,169755	0,164323
AOD 779nm	0,1273	0,1888	0,18826	0,142891	0,179414	0,177168
AOD 667nm	0,1510	0,2150	0,21895	0,163671	0,200484	0,205612
AOD 620nm	0,1640	0,2299	0,23420	0,175332	0,211100	0,220486
AOD 560nm	0,1859	0,2543	0,26190	0,194556	0,230445	0,247066
AOD 510nm	0,2079	0,2793	0,29050	0,214621	0,251795	0,276285
AOD 490nm	0,2163	0,2880	0,30092	0,222911	0,259967	0,287855
AOD 443nm	0,2425	0,3173	0,33410	0,247029	0,284315	0,322171
AOD 412nm	0,2667	0,3432	0,36280	0,266241	0,303928	0,349083
AOD 400nm	0,2801	0,3569	0,37790	0,275084	0,313003	0,361403
$\alpha(440-870)$	1,1110	0,8871	0,98910	0,979185	0,782825	1,027634
$\alpha(440-675)$	1,1687	0,9532	1,06210	1,051961	0,867812	1,117899

В данной работе был проведен сравнительный анализ аэрозольных оптических характеристик на станциях *AERONET* (*Galata Platform* и *Section\_7 Platform*)

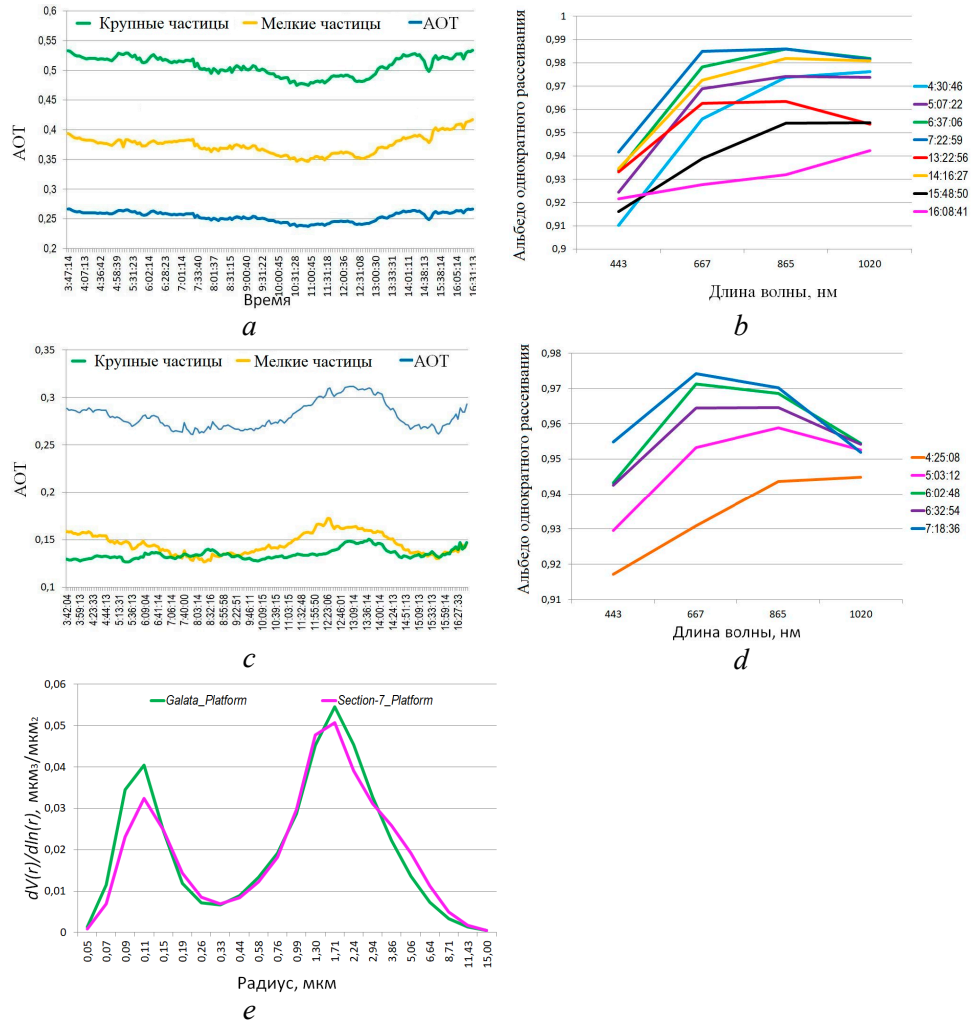


для случаев различной аэрозольной активности, а именно: за 28.07.2021 (день интенсивного пылевого переноса), 27.08.2021 (день до пылевого переноса при наличии фонового аэрозоля) и 29.08.2021 (последующий день после начала интенсивного пылевого переноса). Стоит отметить, что в июле 2021 г. над станциями *AERONET* часто наблюдалась облачность. Следовательно, изначально среднемесячные значения АОТ были завышенными, что характерно для летних месяцев [35] (табл. 1).



**Р и с. 1.** Спутниковые снимки *VIIRS-SNPP/JPSS* за 28.07.2021 (a) и 29.07.2021 (c) (источник: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), соответствующие им обратные траектории *HYSPLIT* (b, d) (источник: [https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php))  
**F i g. 1.** Satellite images of *VIIRS-SNPP/JPSS* from 07.28.2021 (a) and 07.29.2021 (c) (source: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), and corresponding *HYSPLIT* back trajectories (b, d) (source: [https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php))

На обеих западных станциях *AERONET* Черноморского региона 28.07.2021 отмечалось большое количество (по сравнению с фоновыми значениями) крупнодисперсной фракции аэрозоля (более 2,5 мкм) и низкие ( $SSA < 1$ ) значения показателя альbedo однократного рассеивания ( $SSA$ ) (рис. 2). В целом 29.07.2021 наблюдалась аналогичная ситуация, не считая более высоких значений параметра Ангстрема.



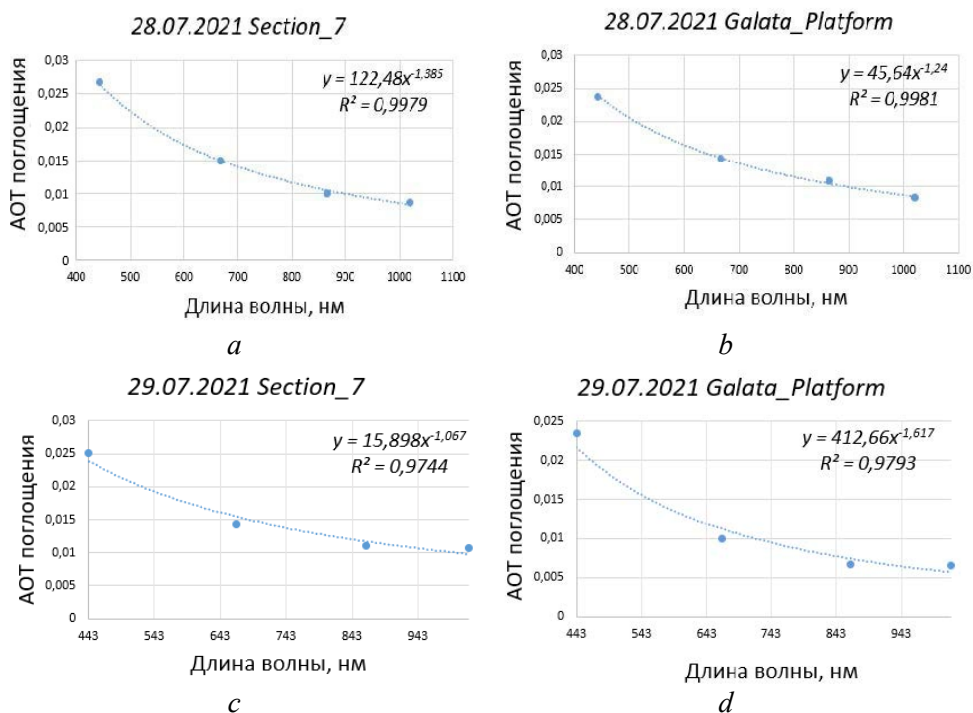
**Р и с. 2.** На станциях сети *AERONET* за 28.07.2021: вклад мелкодисперсных (менее 2,5 мкм) и крупнодисперсных частиц (2,5 мкм и более) в общее распределение AOT на *Galata\_Platform* (a) и *Section\_7* (c), альbedo однократного рассеивания на *Galata\_Platform* (b) и *Section\_7* (d), распределение частиц по размерам на двух станциях (e)

**F i g. 2.** At the *AERONET* network stations on 07.28.2021: contribution of fine (less than 2.5 mkm) and coarse (2.5 mkm and more) particles to the overall distribution of AOD at *Galata\_Platform* (a) and *Section\_7* (c), single scattering albedo at *Galata\_Platform* (b) and *Section\_7* (d), particle size distribution at two stations (e)

Для общей оценки поглощающих свойств пылевого аэрозоля впервые дана оценка оптической толщины аэрозольного поглощения:

$$a_0(\lambda) = (1 - \Lambda(\lambda))\tau_a^0(\lambda). \quad (4)$$

Следовательно, для синхронных пар измерений AOT и SSA на станциях AERONET был проанализирован среднечасовой ход степенной функции оптической толщины поглощения (рис. 3).



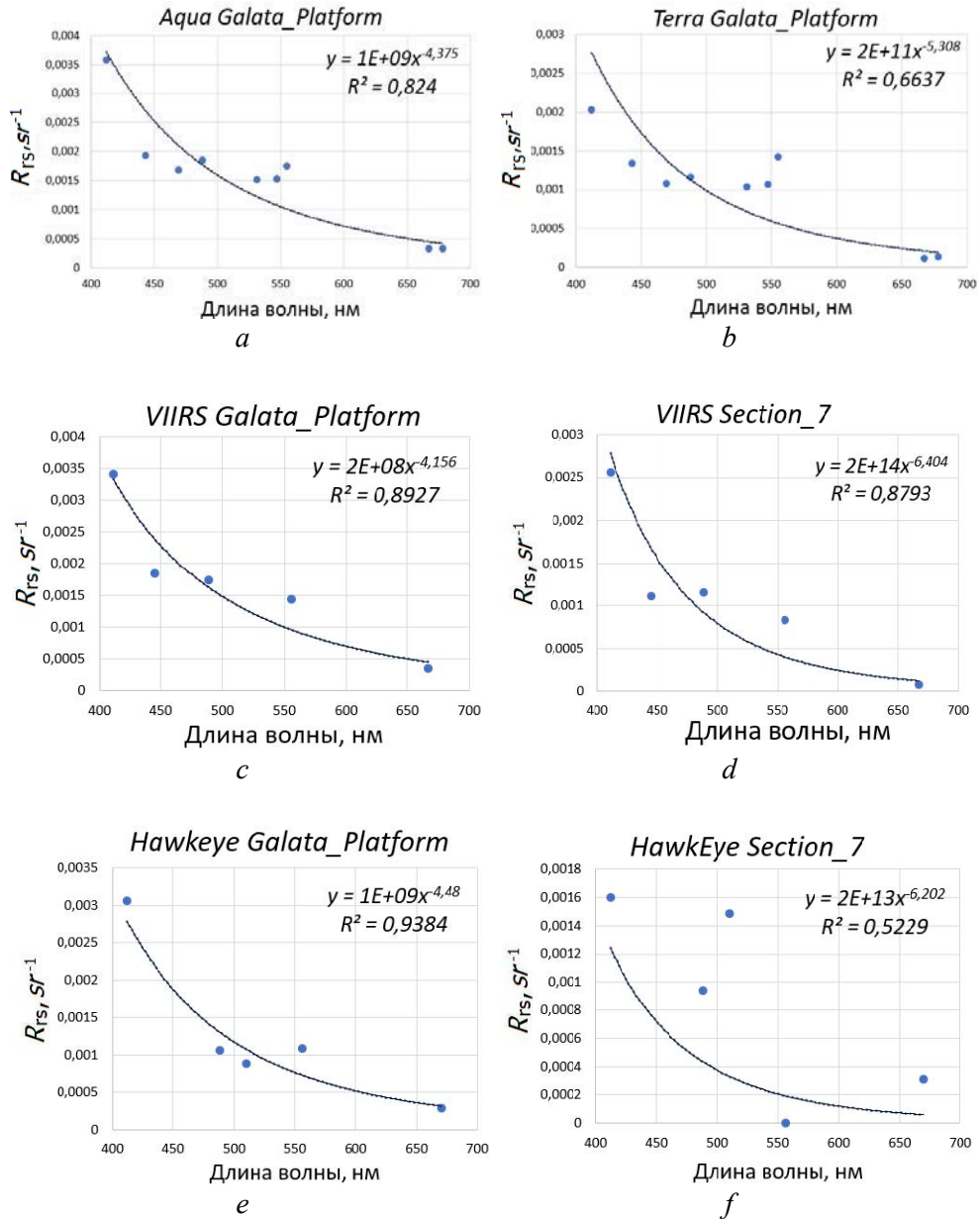
**Р и с. 3.** Ход степенной функции оптической толщины аэрозольного поглощения за 28.07.2021 на *Section\_7* (a), *Galata\_Platform* (b) и 29.07.2021 на *Section\_7* (c), *Galata\_Platform* (d)

**F i g. 3.** Mode of the power function of aerosol absorption optical depth at *Section\_7* (a) and *Galata\_Platform* (b) for 07.28.2021, and at *Section\_7* (c) and *Galata\_Platform* (d) for 07.29.2021

Из рис. 3 видно, что ход степенной функции близок к виду  $\lambda^{-1}$ . Следовательно, величина ошибки атмосферной коррекции зависит не только от множителя  $\lambda^{-4}$ , но и от поглощения света аэрозолем. В результате погрешность стандартной атмосферной коррекции будет более резко увеличиваться в сторону коротких длин волн. Следует отметить, что стандартная процедура атмосферной коррекции не в состоянии качественно оценить изменение спектральных свойств рассеяния аэрозолем под влиянием поглощения света в ближней ИК области вследствие малости данного эффекта в длинноволновой части спектра. По этой причине необходимо руководствоваться дополнительной информацией об оптических свойствах подстилающей поверхности в коротковолновой области. Таким образом, работа стандартных алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных в присутствии поглощающего пылевого

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024 775

аэрозоля требует проведения дополнительной региональной коррекции. В качестве функции интерполяции следует использовать произведение  $a_0(\lambda) \cdot \lambda^{-4}$ , причем коэффициент пропорциональности находится из условий, налагаемых на коэффициент яркости моря в коротковолновой области спектра.



**Р и с. 4.** Ошибки атмосферной коррекции и их аппроксимация степенной зависимостью за 28.07.2021

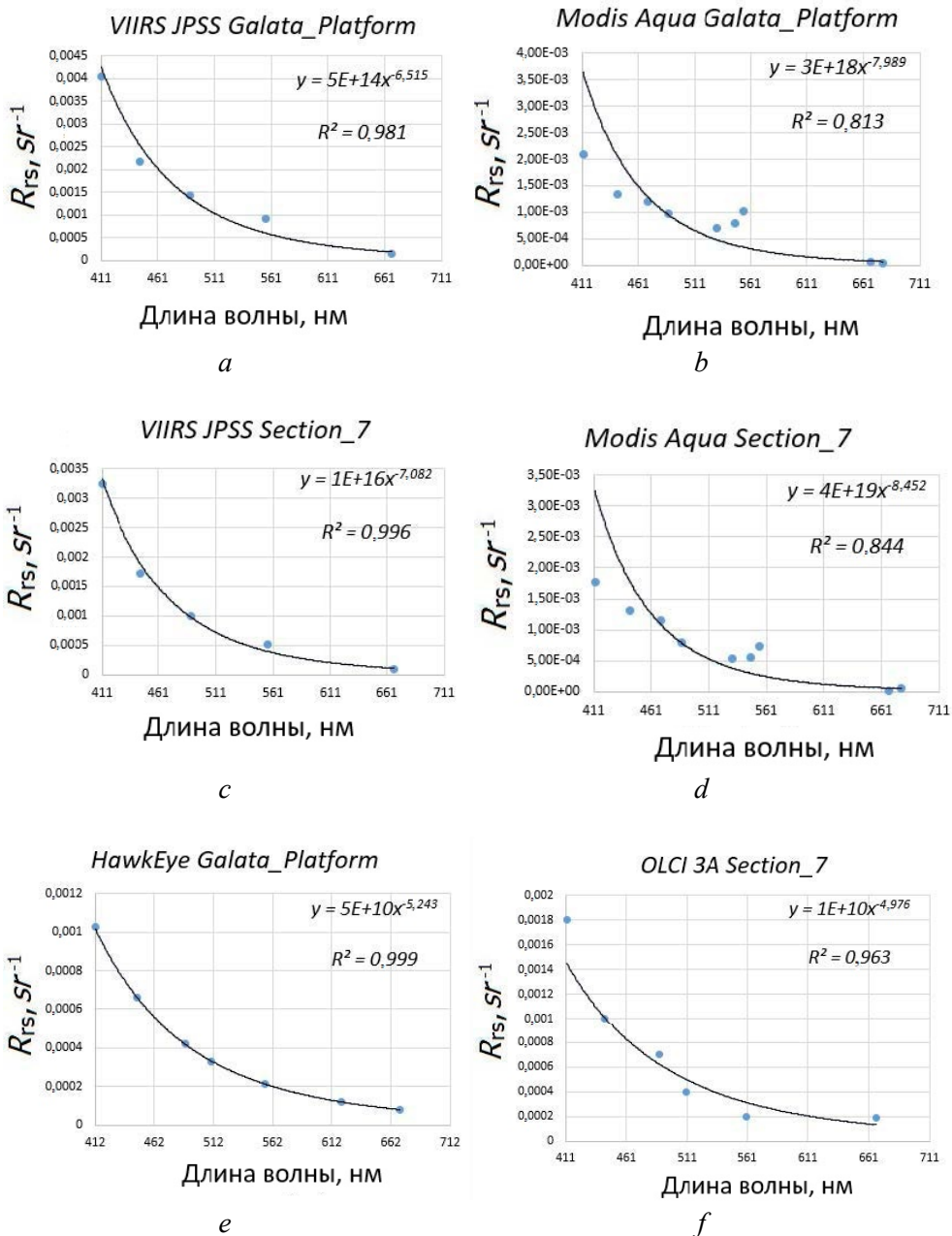
**Fig. 4.** Errors of atmospheric correction and their approximation by power dependence for 07.28.2021

Следующим этапом исследования является расчет ошибки атмосферной коррекции для спутников *MODIS-Aqua/Terra*, *VIIRS-SNPP/JPSS*, *HawkEye* и *Sentinel-3A* за исследуемые даты. Процедуру валидации спутниковых данных проводили аналогично процедуре валидации в базе *SeaBASS*: были отобраны синхронные пары измерений с наименьшей разницей по времени в радиусе 5 км от западных черноморских станций *AERONET-OC*. При помощи программного пакета *SeaDAS* аналогично исключались все пиксели, содержащие следующие флаги ошибок: *LAND* (земля), *STRAYLIGHT*, *HIGLINT*, *HILT*, *MODGLINT*, *ATMWAR* (засветка) и *NAVFAILE* (ошибки навигации) [36]. К сожалению, в дальнейшем анализе данные со спутника *VIIRS-SNPP* за 28.07.2021 были исключены из рассмотрения, так как все пиксели, находящиеся в радиусе 5 км от станций *AERONET-OC*, оказались в зоне спутниковой засветки. Синхронные натурные измерения  $R_{rs}(\lambda)$  на западных черноморских станциях *AERONET-OC* в течение дня изменялись слабо, а именно: среднеквадратичное отклонение (СКО) составляло менее 10 % от величины, и это позволило использовать среднедневные значения. Результаты интерполяции, построенные по результатам измерений коэффициентов яркости спутниками *MODIS-Aqua*, *VIIRS-JPSS*, *Hawkeye* и *OLCI Sentinel-3A* за 28.07.2021, представлены на рис. 4.

Аналогично рассчитывалась ошибка атмосферной коррекции и для 29.07.2021, когда АОТ пылевого аэрозоля был выше, но параметр Ангстрема – ниже (рис. 5). К сожалению, данные *Modis-Terra* и *VIIRS-SNPP* имели сильные выбросы и после фильтрации флагов ошибок данных не осталось.

В результате аппроксимации ошибок атмосферной коррекции за 28.07.2021 были получены степенные зависимости, близкие к  $\lambda^{-5}$ . Это объясняется суммарным вкладом: 1) молекулярной составляющей ( $\lambda^{-4}$ ) и 2) аэрозольного поглощения ( $\lambda^{-1}$ ). Из рис. 4 следует, что ошибка атмосферной коррекции коэффициента яркости для станции *Galata Platform*, полученная по измерениям *VIIRS-JPSS* и *HawkEye*, близка к степенной зависимости  $\lambda^{-4} - \lambda^{-5}$ , а для станции *Section 7* она имеет более ярко выраженную степенную зависимость, а именно  $\lambda^{-7}$ . Ярko выраженный ход степенной функции наблюдается 29.07.2021, когда концентрация пылевого аэрозоля возрастает и его аэрозольное поглощение уже близко к  $\lambda^{-2}$ . Стоит отметить, что за 29.07.2021 по данным *MODIS-Aqua* найдены наибольшие ошибки атмосферной коррекции, функция интерполяции которых близка к виду  $\lambda^{-8}$ . Мы считаем, что это обусловлено заниженными данными измерений  $R_{rs}$  в длинноволновой области за этот день и, как следствие, большими погрешностями при стандартной аппроксимации степенным законом – методом логарифмирования с последующей линейной оптимизацией. При использовании нелинейной аппроксимации был получен ход степенной функции вида  $\lambda^{-4} - \lambda^{-5}$ , что также свидетельствует о больших ошибках в коротковолновой области спектра. Максимальные ошибки в синей области наблюдаются на рис. 4, а, с; 5, а, с.

Стоит отметить, что, несмотря на небольшой срок службы и малое количество репроцессингов и калибровок, новые спутники *HawkEye* и *Sentinel-3A* показывают более точные результаты. Возможно это связано с лучшим пространственным разрешением новых спутниковых инструментов.



**Р и с. 5.** Ошибки атмосферной коррекции по результатам измерений коэффициентов яркости спутниками *MODIS-Aqua*, *VIIRS-JPSS*, *Hawkeye* и *OLCI Sentinel-3A* за 29.07.2021 для черноморских станций *AERONET-OC*

**F i g. 5.** Errors of atmospheric correction based on the results of measurements of sea remote sensing reflectance by satellites *MODIS-Aqua*, *VIIRS-JPSS*, *Hawkeye* and *OLCI Sentinel-3A* for the Black Sea *AERONET-OC* stations for 07.29.2021

Анализ спутниковых данных *CALIPSO* о стратификации различных типов аэрозоля за 28 и 29 июля 2021 г. подтвердил наличие частиц пыли в приземном

атмосферном столбе высотой до 5 км над территорией Черного моря. Загрязненная пыль и дымовой аэрозоль, помимо пылевого аэрозоля, были зарегистрированы 29.07.2021, что также подтверждает пространственное распределение дыма, который визуализируется на рис. 1, с, в направлении Черноморского региона.

### Заключение

В результате аппроксимации ошибок атмосферной коррекции спутниковых данных за 28.07.2021 были получены степенные зависимости, близкие к  $\lambda^{-5}$ . Это объясняется суммарным вкладом молекулярной составляющей ( $\lambda^{-4}$ ) и аэрозольного поглощения ( $\lambda^{-1}$ ). За 29.07.2021 наблюдается ярко выраженный ход степенной функции, так как концентрация пылевого аэрозоля в этот день возрастает, а вклад аэрозольного поглощения становится близок к степенной зависимости  $\lambda^{-2}$ . Также за 29.07.2021 над исследуемым регионом по спутниковым данным CALIPSO было показано присутствие не только пылевого, но и дымового аэрозоля. По данным моделирования обратных траекторий воздушных потоков HYSPLIT показано, что аэрозольные массы в этот день двигались в направлении Черного моря со стороны юго-запада (о. Крит), что дополнительно подтверждается высокими значениями АОТ над восточной частью акватории Средиземного моря за 29.07.2021. Предполагается, что комбинация двух поглощающих типов аэрозолей вызвала еще большие неточности определения спектрального коэффициента яркости моря за исследуемый период.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Bodele depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest / I. Koren [et al.] // Environmental Research Letters. 2006. Vol. 1, no. 1. 014005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/1/1/014005>
2. Kubilay N., Cokacar T., Oguz T. Optical properties of mineral dust outbreaks over the north-eastern Mediterranean // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. Vol. 108, iss. D21. 4666. <https://doi.org/10.1029/2003JD003798>
3. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1. С. 20–32. EDN VTPCYX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-20-32>
4. Суслин В. В., Чурилова Т. Я. Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. Вып. 22. С. 47–60. EDN WTBHRN.
5. Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки теплосодержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. / Д. И. Глуховец [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 214–225. EDN PUJNH. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-214-225>
6. Корчемкина Е. Н., Шибанов Е. Б., Ли М. Е. Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 24–30. EDN JVVGXQ.
7. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О. В. Копелевич [и др.]. М. : ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. 140 с. EDN YOSZPV.
8. Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 69–79. EDN YXQYNV.

9. Суетин В. С., Королев С. Н. Использование спутниковых данных для определения характеристик поглощения света в водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 2. С. 222–232. EDN YDISMQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-222-232>
10. Localization of aerosol sources in East-European region by back-trajectory statistics / V. Kabashnikov [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 35, iss. 19. P. 6993–7006. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.960621>
11. AERONET-OC: A network for the validation of Ocean Color primary products / G. Zibordi [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 8. P. 1634–1651. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO654.1>
12. Калинин Д. В., Суслин В. В. Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 1. С. 59–67. EDN TPPRCB.
13. Kalinskaya D. V., Papkova A. S. Why is it important to consider dust aerosol in the Sevastopol and Black Sea Region during remote sensing tasks? A case study // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 8. 1890. <https://doi.org/10.3390/rs14081890>
14. Wang M., Son S., Harding Jr. L. W. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. Vol. 114, iss. C10. C10011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005286>
15. Schollaert S. E., Yoder J. A., O'Reilly J. E., Westpha D. L. Influence of dust and sulfate aerosols on ocean color spectra and chlorophyll *a* concentrations derived from SeaWiFS off the U.S. east coast // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C6. 3191. <https://doi.org/10.1029/2000JC000555>
16. Суетин В. С., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Использование спутниковых наблюдений для определения спектральных зависимостей оптических характеристик вод Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 3. С. 77–86. EDN TEWSCT.
17. Калинин Д. В., Панкова А. С. Изменчивость коэффициента яркости в условиях пылевого переноса по данным спутника Sentinel-3 на примере Черного моря и Севастополя // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 3. С. 399–415. EDN MJXKNT. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-3-399-415>
18. Шибанов Е. Б., Панкова А. С. Особенности работы алгоритмов атмосферной коррекции Ocean Color при расчете спектрального коэффициента яркости моря для различных состояний атмосферы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 6. С. 9–17. EDN WWSIWZ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17>
19. Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives / X. Wei [et al.] // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2020. Vol. 50, iss. 16. P. 1640–1725. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1665944>
20. New methods for improving the remote sensing estimation of soil organic matter content (SOMC) in the Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve (ELWNNR) in northwest China / X. Wang [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 218. P. 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.020>
21. Gordon H. R. Evolution of Ocean Color atmospheric correction: 1970–2005 // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 24. 5051. <https://doi.org/10.3390/rs13245051>
22. Moulin S., Launay M., Guérif M. The crop growth monitoring at a regional scale based on the combination of remote sensing and process-based models // *Crop monitoring and prediction at regional scales*. Tsukuba, Japan, 2001. P. 187–195.
23. Korchemkina E. N., Kalinskaya D. V. Algorithm of Additional correction of level 2 remote sensing reflectance data using modelling of the optical properties of the Black Sea waters // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 4. 831. <https://doi.org/10.3390/rs14040831>
24. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 3, № 2. С. 99–105. EDN NDPPHL.



25. *Remer L. A., Kahn R. A., Koren I.* Aerosol indirect effects from satellite: Skeptics vs. Optimists // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73, iss. 13, supplement. A1088. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.014>
26. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 20–32. EDN VTPCYX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-20-32>
27. *Gordon H. R., Wang M.* Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of ocean-color sensors // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 33. P. 7754–7763. <https://doi.org/10.1364/AO.33.007754>
28. Trends in MODIS and AERONET derived aerosol optical thickness over Northern Europe / P. Glantz [et al.] // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. Vol. 71, iss. 1. 1445379. <https://doi.org/10.1080/16000889.2018.1554414>
29. In situ autonomous optical radiometry measurements for satellite ocean color validation in the Western Black Sea / G. Zibordi [et al.] // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11, iss. 2. P. 275–286. <https://doi.org/10.5194/os-11-275-2015>
30. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureca missions / G. Thuillier [et al.] // *Solar Physics*. 2003. Vol. 214. P. 1–22. <https://doi.org/10.1023/A:1024048429145>
31. Концентрация пигментов фитопланктона в северо-западной части Черного моря по данным измерений спутниковым цветовым сканером SZCZ / В. С. Суевин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2000. № 2. С. 74–82.
32. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / A. H. Omar [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 10. P. 1994–2014. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>
33. *Omar A. H., Tackett J., Al-Dousari A.* CALIPSO observations of sand and dust storms and comparisons of source types near Kuwait City // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, iss. 12. 1946. <https://doi.org/10.3390/atmos13121946>
34. NOAA’s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system / A. F. Stein [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96, iss. 12. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
35. Сезонная и межгодовая изменчивость оптических характеристик атмосферы над Черным морем в районе Севастополя в период 2006–2008 года / Д. В. Яковлева [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2009. Вып. 18. С. 205–212. EDN YMIJMT.*
36. *Werdell P. J., Bailey S. W.* The SeaWiFS bio-optical archive and storage system (SeaBASS): current architecture and implementation. Greenbelt, MD, USA : Goddard Space Flight Center, 2002. 45 p. (NASA/TM 2002–211617).

*Об авторах:*

**Папкова Анна Станиславовна**, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 1683-7685, Scopus Author ID: 57203015832**, [hanna.papkova@gmail.com](mailto:hanna.papkova@gmail.com)

**Шибанов Евгений Борисович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9906-9983, Scopus Author ID: 6507075380, WoS ResearcherID: ABB-9097-2021**, [e-shybanov@mail.ru](mailto:e-shybanov@mail.ru)

**Калинская Дарья Владимировна**, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2622-1010, Scopus Author ID: 56380591500**, [kalinskaya@mhi-ras.ru](mailto:kalinskaya@mhi-ras.ru)

Научная статья

УДК 550.344.42+551.466.62

EDN: MSGZQX

## Экспресс-метод оперативного прогноза цунами: возможность применения на Тихоокеанском побережье России

Ю. П. Королёв

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*

✉ *Yu\_P\_K@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 27.06.2024;  
принята к публикации 17.07.2024.

### *Аннотация*

*Цель.* Целью работы являлось исследование возможности краткосрочного прогноза цунами на Курильских островах по данным о цунами в открытом океане.

*Методы и результаты.* Рассмотрены способы, лежащие в основе действий служб предупреждения о цунами в северо-западной части Тихого океана. Службы предупреждения, опирающиеся на первичную сейсмологическую информацию о землетрясении (магнитудный критерий), выпускают большое количество ложных тревог цунами. Адекватный прогноз дают службы, использующие информацию о сформировавшемся цунами в открытом океане (гидрофизические способы). Описана проблема краткосрочного (оперативного) прогноза цунами для Курильских островов. Приведены сведения о действиях служб предупреждения о цунами во время событий. Выполнено численное моделирование процесса прогнозирования экспресс-методом оперативного прогноза цунами в предположении получения информации о цунами в океане в режиме реального времени. Моделировались события 2006–2020 гг. в северо-западной части Тихого океана. Результаты численных экспериментов с использованием фактических данных подтвердили, что на основе экспресс-метода возможен краткосрочный прогноз цунами в конкретных пунктах Курильских островов с заблаговременностью, достаточной для своевременного принятия решения об объявлении тревоги и эвакуации населения из опасных мест.

*Выводы.* Развитие экспресс-метода краткосрочного прогноза цунами при условии оперативного получения информации о цунами в океане позволит в перспективе повысить качество прогнозирования и тем самым уменьшить количество ложных тревог цунами на Курильских островах. Показана необходимость создания собственных российских глубоководных станций измерения уровня океана.

**Ключевые слова:** цунами, прогноз цунами, краткосрочный прогноз цунами, оперативный прогноз цунами, тревога цунами, ложные тревоги цунами, цунами Тохоку, уровень океана, измерения уровня океана, службы предупреждения о цунами, Тихий океан, Курильские острова

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за полезные замечания и предложения, которые были учтены при доработке статьи.

**Для цитирования:** *Королёв Ю. П.* Экспресс-метод оперативного прогноза цунами: возможность применения на Тихоокеанском побережье России // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 782–800. EDN MSGZQX.

## Express Method for Operational Tsunami Forecasting: Possibility of its Application on the Pacific Coast of Russia

Yu. P. Korolev

*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*  
✉ [Yu\\_P\\_K@mail.ru](mailto:Yu_P_K@mail.ru)

### Abstract

*Purpose.* The work is aimed at studying the possibility of short-term tsunami forecasting in the Kuril Islands based on the data on tsunamis in the open ocean.

*Methods and Results.* The methods underlying the actions of tsunami warning services in the north-western Pacific Ocean are considered. The warning services relying on primary seismological information on an earthquake (magnitude criterion), produce a large number of false tsunami alarms. An adequate forecast is provided by the services that use information on a tsunami formed in the open ocean (hydrophysical methods). The problem of short-term (operational) tsunami forecasting for the Kuril Islands is described. Information on the actions of tsunami warning services during the events is provided. The process of forecasting using the express method of tsunami operational forecast is numerically simulated under the assumption of obtaining real-time information on tsunamis in the ocean. The events of 2006–2020 in the northwest Pacific Ocean are simulated. The results of numerical experiments involving actual data confirms the fact that the express method can be used for a short-term tsunami forecast in specific locations of the Kuril Islands with an advance time sufficient for taking a timely decision to declare an alarm and evacuate the population from hazardous places.

*Conclusions.* Development of the express method for short-term tsunami forecasting, provided that information on tsunamis in the ocean is available quickly, will make it possible to improve in future the quality of forecasting and thereby reduce the number of false tsunami alarms on the Kuril Islands. The necessity of creating own, Russian, deep-sea ocean level measurement stations is shown.

**Keywords:** tsunami, tsunami forecast, short-term tsunami forecast, operational tsunami forecast, tsunami alarm, false tsunami alarms, Tohoku tsunami, ocean level, ocean level measurements, tsunami warning services, Pacific Ocean, Kuril Islands

**Acknowledgments:** The author is grateful to the reviewers for their useful comments and suggestions, which were taken into account when finalizing the article.

**For citation:** Korolev, Yu.P., 2024. Express Method for Operational Tsunami Forecasting: Possibility of its Application on the Pacific Coast of Russia. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 736-754.

### Введение

Краткосрочный (оперативный) прогноз цунами до настоящего времени остается нерешенной проблемой в ряде стран бассейнов Тихого, Индийского и Атлантического океанов. Службы предупреждения о цунами этих стран при возникновении подводных землетрясений своевременно объявляют тревоги цунами, среди которых часто встречаются ложные [1, 2]. Общепринято, что под ложной тревогой цунами понимается событие, когда объявляется тревога, производится эвакуация населения, однако волны не вызывают затопления, не причиняют ущерба [1]. Ложные тревоги цунами, часто объявляемые с излишней заблаговременностью, не наносят прямых потерь, но причиняют ущерб, связанный с остановкой производства в опасных местах, эвакуацией населения в безопасные зоны, выводом судов в открытое море. При этом вся-

кого рода деятельность в прибрежной полосе останавливается на несколько часов [3].

Задачей оперативного (краткосрочного) прогноза цунами является заблаговременное получение информации об ожидаемом цунами. Эта информация должна включать в себя время прихода первой волны, количество волн, их амплитуды, интервалы времени между ними, продолжительность цунами [4]. Эти характеристики цунами перечислены также в определении понятия «прогноз цунами», сформулированном Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО в 2013 г.<sup>1</sup> На основании такой информации должно приниматься решение об объявлении тревоги цунами с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу. Под заблаговременностью прогноза понимается время, которое проходит от момента выработки прогноза до прихода ожидаемого цунами в заданный пункт.

Целью оперативного прогноза цунами является обеспечение безопасности населения, движимого имущества, устойчивости функционирования прибрежной инфраструктуры, прибрежных территорий в условиях вероятной угрозы цунами.

Обзор состояния дел в области прогноза цунами дан в [1, 2]. В работах описаны принципы, положенные в основу действий различных служб предупреждения о цунами (СПЦ). Принципы действия СПЦ в северо-западной части Тихого океана описаны в [3].

В практике СПЦ применяются два основных подхода, основанные на информации о землетрясении или о цунами в открытом океане. Первый из них, магнитудно-географический способ, предложенный около 60 лет назад, в самом начале развития служб предупреждения о цунами, основан на эмпирических соотношениях между магнитудой землетрясения и интенсивностью цунами. Такой подход является причиной большого количества (не менее 75 %) ложных тревог цунами, объявленных всеми службами [1, 5, 6]. Подходы, основанные на связи магнитуды землетрясения и его вероятного механизма, предлагаются и реализуются службами предупреждения о цунами в Японии<sup>2</sup>, Австралии [7], России [8]. Прогнозирование цунами выполняется с использованием базы расчетных мареограмм вблизи побережий от множества сейсмических источников с наиболее вероятным механизмом.

Другой подход связан с развитием сети глубоководных станций системы *DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis* – оценка и сообщение о цунами в океане) наблюдений за уровнем океана<sup>3</sup>. Прогноз ожидаемого цунами осуществляется гидрофизическим способом прогноза *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration* – Национальное управление океани-

---

<sup>1</sup> Tsunami Glossary / Intergovernmental Oceanographic Commission. Fourth Edition. Paris : UNESCO, 2019. P. 35–36. (IOC Technical Series ; 85). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226> (дата обращения: 15.06.2024).

<sup>2</sup> Users' Guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. Paris : UNESCO, 2019. 35 p. (IOC Technical Series ; no. 142). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93> (дата обращения: 15.06.2024).

<sup>3</sup> NOAA Center for Tsunami Research. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/> (дата обращения: 15.06.2024).

ческих и атмосферных исследований)<sup>3</sup>, известным также как способ *SIFT* (*Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis* – краткосрочный прогноз затопления от цунами)<sup>4</sup> [9, 10]. По данным о цунами в океане выполняется расчет волновых форм в заданных точках в океане или вблизи побережья на основе заранее созданной гигантской базы синтетических мареограмм. При вычислениях степень совпадения расчетных волновых форм и реальных мареограмм не оценивается<sup>3</sup>. Прогнозы цунами способом *NOAA* соответствуют определению МОК ЮНЕСКО. Эта методология прогнозирования в режиме реального времени в настоящее время официально используется службами предупреждения о цунами США [2]. Для областей, для которых отсутствует заранее рассчитанная база синтетических мареограмм, способ *NOAA* (*SIFT*) не применим [3].

Близкий, но более строгий подход, предложенный в [11], определяет наиболее информативные точки для прогнозирования цунами. Использование набора таких точек, специфичных для каждого события, может быть полезным при разработке оптимальной системы наблюдений за цунами. Этот подход предполагает возможность оперативного прогнозирования цунами.

Дальневосточное побережье Российской Федерации, особенно тихоокеанское побережье Курильских о-вов, относится к цунамиопасным территориям<sup>5</sup>.

В 2024 г. исполняется 72 года со дня разрушительного цунами 4–5 ноября 1952 г. на северных Курильских о-вах. Цунами возникло в результате землетрясения с магнитудой 9 юго-восточнее п-ова Камчатка и вызвало затопление на побережьях о. Парамушир и о. Шумшу (северные Курильские о-ва)<sup>6</sup> высотой до 23 м. Были уничтожены г. Северо-Курильск и все населенные пункты на этих островах. Имеется большое количество публикаций, посвященных этому событию, например работа<sup>7</sup>.

После цунами 1952 г. в России была создана система предупреждения о цунами, ориентированная на информацию о землетрясениях (магнитуду и координаты эпицентра).

Сильнейшее землетрясение с магнитудой 9,1 восточнее о. Хонсю 11 марта 2011 г. вызвало затопление побережья Курильских о-вов с максимальным заплеском высотой до 2,5 м на о. Парамушир, выше 2 м на о. Кунашир и до 2 м на о. Итуруп<sup>6</sup>. На основании магнитуды землетрясения и информации в Интернете станции *DART 21401* своевременно объявлена тревога цунами на Курильских о-вах, произведена эвакуация населения [12].

В 2006 и 2007 гг. произошли два землетрясения восточнее о. Симушир (центральные Курильские о-ва). Первое из них (15.11.2006) имело магнитуду 8,3, второе (13.01.2007) – 8,1. В обоих случаях во всех населенных пунктах Курильских о-вов в соответствии с регламентом на основании магнитудного

---

<sup>4</sup> Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-Term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT) / E. Gica [et al.]. Seattle, WA : Department of Commerce, 2008. 95 p. (NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139).

<sup>5</sup> Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami> (дата обращения: 15.06.2024).

<sup>6</sup> National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (дата обращения: 15.06.2024).

<sup>7</sup> Цунами 1952 года, Северо-Курильск. URL: [http://www.sakhalin.ru/Region/Tsunami\\_1952/tsunami\\_1952.htm](http://www.sakhalin.ru/Region/Tsunami_1952/tsunami_1952.htm) (дата обращения: 15.06.2024).

критерия одновременно были объявлены тревоги цунами, выполнена эвакуация населения. Заплески цунами составили до 21,9 м на ближайших ненаселенных центральных Курильских о-вах [13, 14]. В то же время в населенных пунктах цунами были незначительными, не представлявшими опасности: например в Южно-Курильске максимальная амплитуда составила 0,28 м в первом событии и 0,06 м во втором <sup>6</sup>.

25 марта 2020 г. восточнее о. Онекотан (северные Курильские о-ва) в 13:49 по сахалинскому времени (*SAKT*) произошло землетрясение с магнитудой 7,5. Ввиду того, что информация о действиях служб предупреждения во время события обычно не публикуется, ниже описаны действия СПЦ во время этого события. Это позволит понять порядок действий СПЦ в настоящее время и оценить возможные изменения в будущем.

Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (ТЦПЦ) в 13:57 по сахалинскому времени выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 1000 км от эпицентра землетрясения. Тревога цунами по Северо-Курильскому району сейсмостанцией Южно-Сахалинск на основе магнитудного критерия объявлена в 14:00. Консультативный центр по цунами в северо-западной части Тихого океана, а именно Японское метеорологическое агентство (ЯМА), в 14:16 также предупредил о возможных разрушительных волнах цунами на побережье Курильских о-вов с амплитудой 1–3 м. Приход цунами в Северо-Курильск ожидался в 15:04. Эвакуация 400 человек была завершена в 14:30, за полчаса до ожидаемого прихода волны. Высота волны в ожидаемое время вне населенного пункта, по визуальной оценке, на фоне штормового волнения составила 50 см <sup>5</sup>. Данные о проявлении цунами в порту Северо-Курильска отсутствуют. Длительность тревожного режима составила около 4 ч [15]. В последних трех событиях, ввиду малой амплитуды волн в населенных пунктах, объявленные в них тревоги были явно ложными.

В настоящее время российские центры предупреждения о цунами при принятии решения об объявлении тревоги цунами опираются на магнитудно-географический критерий, выработанный около 60 лет назад, и предупреждения, выпускаемые ТЦПЦ и ЯМА, что приводит к объявлению ложных тревог цунами. Российская СПЦ не располагает собственными глубоководными станциями измерения уровня океана, позволяющими осуществлять наблюдения за уровнем океана и оперативный прогноз цунами, в своей деятельности не использует данные о цунами в открытом океане <sup>8</sup>. По этой причине, а также вследствие отсутствия у нее современных действующих способов прогноза центры цунами не дают адекватный прогноз цунами на побережье Дальнего Востока. Способ *NOAA (SIFT)* для прогноза цунами на Дальневосточном побережье России ввиду отсутствия соответствующей базы синтетических мареграмм не применим.

Возникает законный вопрос: возможно ли коренное улучшение работы служб предупреждения о цунами, существенное повышение качества прогноза?

---

<sup>8</sup> Камчатский филиал геофизической службы РАН. URL: <https://emsd.ru/conf2019/pdf/solution.pdf> (дата обращения: 07.10.2024) ; URL: [https://emsd.ru/files/conf2021/resolution\\_tsunami.pdf](https://emsd.ru/files/conf2021/resolution_tsunami.pdf) (дата обращения: 07.10.2024) ; URL: <https://emsd.ru/files/conf2023/result.pdf> (дата обращения: 07.10.2024).

### Цель работы и постановка задачи

У российской службы предупреждения трансокеанские цунами, возникающие у побережий Южной Америки, не вызывают озабоченности. Принятие решения об объявлении тревоги опирается на информацию о проявлении цунами на Гавайских о-вах. Однако критерий опасности цунами на Курильских о-вах в зависимости от высот цунами на Гавайских о-вах не выработан. Волны с амплитудами 2 м, зарегистрированные на Гавайских о-вах, не рассматриваются как фактор возникновения опасности заметного цунами на Курильских о-вах [16, 17].

При возникновении цунами вблизи Курильских о-вов решение об объявлении тревоги принимается на основе магнитудно-географического способа. При магнитуде выше пороговой объявляется тревога цунами во всех населенных пунктах островов.

Исходя из поставленного выше вопроса целью работы являлось исследование возможности оперативного достоверного прогноза цунами на Курильских о-вах по данным о цунами в открытом океане.

Для достижения цели выполнялось численное моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами экспресс-методом в предположении получения информации о цунами в океане в условиях режима реального времени. Предполагалось, что момент времени выработки прогноза и момент времени объявления тревоги цунами совпадают. Использовалась информация глубоководных станций измерения уровня океана системы *DART*, расположенных вблизи Курильских о-вов, действовавших во время события, или реконструированные данные станций, действовавших ранее или установленных позднее.

Качество прогноза цунами оценивается по его способности определить степень угрозы и необходимость объявления тревоги только в тех местах, в которых цунами представляет реальную угрозу [3].

### Способ оперативного прогноза цунами

Как отмечалось, центры цунами в настоящее время не дают адекватный прогноз цунами на побережье Дальнего Востока. Детальная информация об ожидаемом цунами по данным об уровне океана могла быть получена экспресс-методом оперативного прогноза [4].

Экспресс-метод заключается в расчете формы ожидаемого цунами в заданной точке  $A$  по данным о цунами в океане в точке  $M$  с помощью передаточной функции (отношение в правой части) в соответствии с соотношением

$$\zeta(A, s) = \zeta(M, s) \cdot \frac{\eta(A, s)}{\eta(M, s)}. \quad (1)$$

Все функции, входящие в формулу (1), являются образами (спектрами) дискретного интегрального преобразования Лапласа соответствующих рядов данных. Выражение (1) является следствием соотношения подобия спектров волновых форм в точках  $A$  и  $M$  двух разных цунами (функции  $\zeta(A, s)$ ,  $\zeta(M, s)$ )

и функции  $\eta(A, s)$ ,  $\eta(M, s)$  с одним и тем же эпицентром  $\frac{\zeta(A, s)}{\zeta(M, s)} = \frac{\eta(A, s)}{\eta(M, s)}$ ,

которое выведено из фундаментального принципа взаимности [4].

Если известны функции  $\eta(M, s)$  и  $\eta(A, s)$  для каждого пункта  $A$ , то обратное преобразование Лапласа соотношения (1) дает волновые формы ожидаемого цунами в каждой из этих точек. Практически в силу того, что в оперативном режиме о землетрясении известны лишь координаты эпицентра (магнитуда не играет роли), в качестве второго цунами принимается численная модель волн, распространяющихся от модельного (вспомогательного) источника в виде начального возвышения свободной поверхности круговой формы произвольной амплитуды, например 10 м, с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Диаметр источника – характерный поперечный горизонтальный размер очага цунами (100 км). Это является главным допущением способа. Предполагается, что подобие, хотя и приближенно, но соблюдается. Расчет волновых форм от вспомогательного источника в точках  $M$  и  $A$  выполняется во время события сразу после получения информации о координатах эпицентра землетрясения. При этом нет необходимости в создании гигантской базы расчетных мареограмм. В силу приближенного характера способа не предполагается полное совпадение расчетных и фактических волновых форм. Ожидается достаточно точное прогнозирование основных характеристик ожидаемого цунами: время прихода, амплитуда и длительность головной волны, время прихода и амплитуда максимальной волны.

Первоначальная версия способа описана в [4]. Позднее для применения в оперативном режиме предложено использовать данные о цунами длительностью, равной первому полупериоду/периоду цунами в океане [18]. В работе [4] показана успешность способа краткосрочного прогноза цунами при расчетах волновых форм на станциях *DART*, зарегистрировавших цунами 2006, 2007 и 2009 гг. в северной части Тихого океана. Эффективность экспресс-метода для прогнозирования трансокеанских цунами, возникающих вблизи побережья Южной Америки, в океане, а также у Курильских о-вов показана в [3, 19]. Качество прогноза цунами для точек в океане экспресс-методом и способом *NOAA* сопоставимо [3].

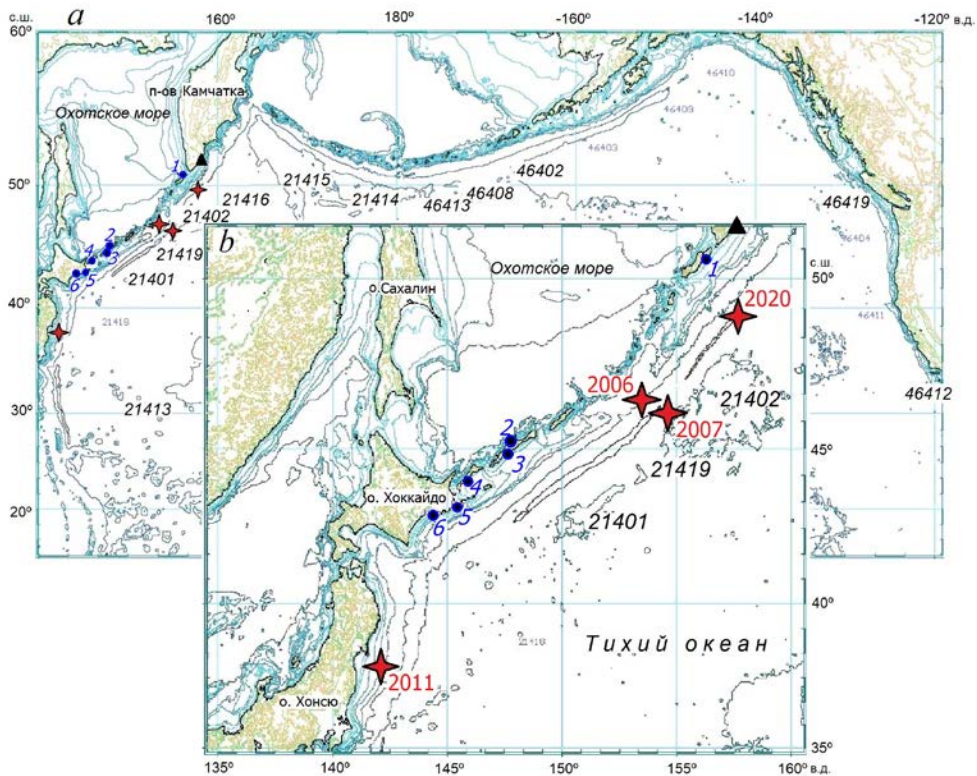
## Результаты

Моделировались процессы оперативного прогнозирования симуширских 2006, 2007 гг. и онекотанского 2020 г. цунами, а также цунами Тохоку 2011 г. на Курильских о-вах.

В численных экспериментах выполнялись действия, подобные тем, которые производились бы в реальных условиях, с соблюдением временных рамок: получение информации о координатах эпицентра землетрясения (через 7–11 мин после главного толчка), построение передаточной функции сразу после получения этой информации, прием информации об уровне океана от ближайшей к очагу станции. Построение передаточной функции должно быть завершено до получения информации об уровне. Современные методы быстрого счета позволяют сделать это в короткое время [20]. Выполнение окончательных расчетов (обратное преобразование Лапласа) осуществляется



сразу после получения информации о прохождении первой четверти первого периода, полупериода или полного периода цунами через точку регистрации. Определялась заблаговременность прогноза. Момент прихода цунами в заданную точку оценивался как момент первого вступления волны (иногда под этим моментом понимается время прихода первого максимума волны). В дальнейшем по мере поступления уроченной информации прогноз может уточняться.



**Р и с. 1.** Схема расчетных областей: *a* – положение станций системы *DART* в северной части Тихого океана, данные которых использовались для сравнения с расчетными; *b* – область вблизи Курильских о-вов, использованная при моделировании процесса оперативного прогноза цунами (черными цифрами обозначено местоположение станций системы *DART*; красными звездочками – эпицентры землетрясений с указанием года; черным треугольником – местоположение автоматизированного поста «Водопадная» (юго-восточная оконечность Камчатки); синими цифрами – населенные пункты: 1 – Северо-Курильск (о. Парамушир), 2 – Курильск (о. Итуруп), 3 – Буревестник (о. Итуруп), 4 – Южно-Курильск (о. Кунашир), 5 – Ханаски (о. Хоккайдо) и 6 – Кусиро (о. Хоккайдо))

**F i g. 1.** Scheme of the computation areas: *a* – location of *DART* stations in the northern Pacific Ocean, the data from which are used for comparison with the calculated ones; *b* – the area near the Kuril Islands used in modeling the process of operational tsunami forecasting (black numbers indicate the location of *DART* stations; red stars – the earthquake epicenters with the year indicated; black triangle – the location of automated tide gauge “Vodopadnaya” (southeastern tip of Kamchatka); blue numbers – the settlements: 1 – Severo-Kurilsk (Paramushir Island), 2 – Kurilsk (Iturup Island), 3 – Burevestnik (Iturup Island), 4 – Yuzhno-Kurilsk (Kunashir Island), 5 – Hanasaki (Hokkaido Island) and 6 – Kushiro (Hokkaido Island))

Схема расчетных областей с указанием эпицентров землетрясений (очагов цунами), местоположений глубоководных станций измерения уровня океана системы *DART* и пунктов на побережьях Курильских о-вов и о. Хоккайдо, для которых выполнялся прогноз, представлена на рис. 1. На рис. 1, *a* показано положение станций *DART* в северной части Тихого океана. Данные этих станций сравнивались с расчетными для подтверждения адекватности результатов. Расчеты выполнены в сферических координатах. Шаг разностной сетки, охватывающей северную часть Тихого океана, равен 3800 м на широте 40°. При расчетах распространения волн в океане использовались батиметрические данные [21, 22]. Расчетная область района Курильских о-вов (рис. 1, *b*) применялась для моделирования процесса оперативного прогноза цунами экспресс-методом. Шаг разностной сетки этой области равен 900 м на широте 45°.

Использовались данные станций *DART*<sup>9</sup> и береговых мареографов<sup>10, 11</sup>. При расчетах из записей удалены приливные составляющие и колебания, вызванные прохождением сейсмических волн по дну (шумы сейсмического происхождения).

Вблизи Курильских о-вов находятся или находились ранее несколько станций системы *DART*, установленных в разное время: *DART 21401* (годы работы 2009–2014), *21402* (2012–2017), *21419* (с 2009 г.). Местоположение станций является оптимальным для каждого конкретного случая в зависимости от близости к очагу цунами. Для событий 2006 и 2007 гг. оптимальным является положение станции *DART 21419*, для события 2020 г. – положение станции *DART 21402*. Ввиду того, что в период соответствующего цунами станции не действовали, предварительно была выполнена реконструкция волновых форм цунами на этих станциях по данным более удаленных станций экспресс-методом. Исходные и реконструированные волновые формы для каждого описываемого события приведены ниже. По реконструированным данным выполнялся расчет волновых форм цунами на более удаленных станциях и вблизи населенных пунктов.

Заблаговременность прогнозирования цунами напрямую связана с оперативностью получения данных о цунами в океане: использование более коротких временных интервалов для анализа позволяет давать прогнозы раньше. Это особенно важно в случаях землетрясений, происходящих недалеко от береговой линии. Были проведены вычисления форм волн цунами на основе восстановленных данных станции *DART 21419* длительностью 16 мин после начала землетрясения (включая четверть первого волнового периода), 20 мин (включая половину периода), 32 мин (включая один полный период) и 108 мин. Результаты вычислений оказались практически идентичными, что подтверждено сравнением с фактическими данными о симуширском цунами 2006 г.

---

<sup>9</sup> National Data Buoy Center : site. URL: [https://ndbc.noaa.gov/to\\_station.shtml](https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml) (дата обращения: 15.06.2024).

<sup>10</sup> Российская служба предупреждения о цунами. URL: <http://rtws.ru/sea-level/> (дата обращения: 15.04.2024).

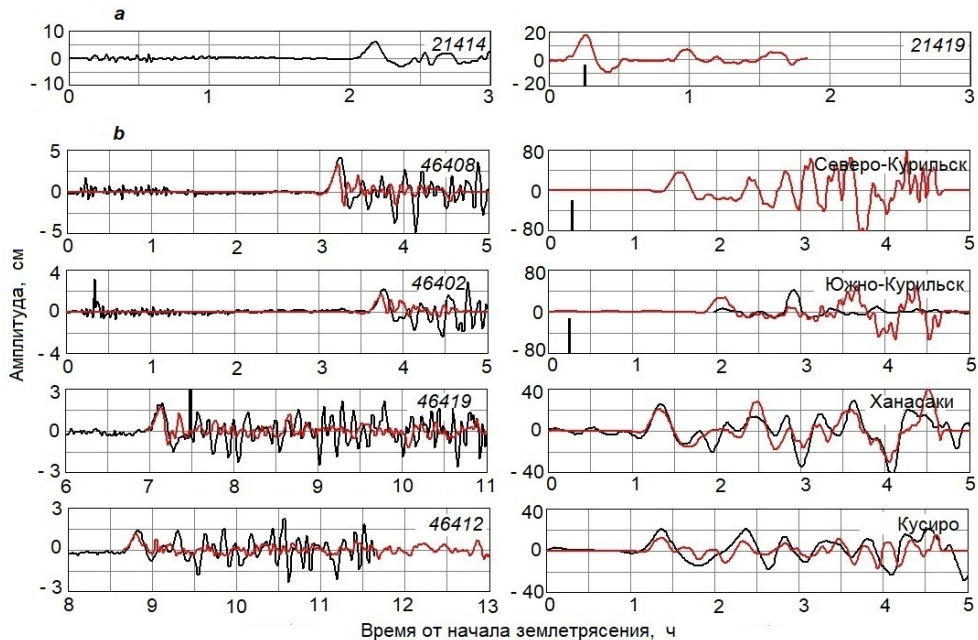
<sup>11</sup> Sea Level Station Monitoring Facility. URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc> (дата обращения: 15.06.2024).

В последующих численных экспериментах для расчетов волновых форм цунами в каждом событии использовались данные соответствующей станции *DART* начиная с момента начала землетрясения, охватывающие первую четверть периода.

### Симуширское цунами 2006 г.

Землетрясение произошло 15.11.2006 на западном склоне Курило-Камчатского желоба<sup>6</sup>. Эпицентр находился в 90 км восточнее о. Симушир.

Возникшее цунами (эпицентр показан на рис. 1) было зарегистрировано станциями *DART*, расположенными вдоль Алеутских о-вов, Западного побережья США до п-ова Калифорния<sup>9</sup>. Ближайшей к Курильским о-вам являлась станция *DART 21414* (рис. 1), время пробега цунами до которой составляло более 2 ч (рис. 2, *a*). Время пробега цунами до точки, в которой в 2009 г. была установлена станция *DART 21419*, равно 10 мин. В этом событии положение станции было бы оптимальным (см. рис. 1). Реконструированная форма цунами в точке 21419 по данным станции *DART 21414* применялась для прогноза. Исходные данные и результат реконструкции представлены на рис. 2, *a*.



**Р и с. 2.** Волновые формы симуширского цунами 2006 г.: *a* – зарегистрированная станцией *DART 21414* (слева) и реконструированная на станции *DART 21419* (справа); *b* – зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по реконструированным данным станции *DART 21419*. Здесь и далее на каждом графике указан номер станции *DART* или название населенного пункта, вертикальная черная линия – граница данных, используемых при прогнозе, а также момент выработки прогноза для пунктов на Курильских о-вах

**F i g. 2.** Waveforms of the 2006 Simushir tsunami: *a* – recorded by *DART 21414* station (left) and reconstructed at *DART 21419* station (right); *b* – recorded (black line) and computed (red line) based on the reconstructed data from *DART 21419* station. Here and further on, each graph is indicated by the *DART* station number or the settlement name, vertical black line is the boundary of the data used in forecasting, as well as the moment of forecast generation for the points on the Kuril Islands

Для подтверждения адекватности реконструированной формы цунами в точке 21419 по этим данным выполнены расчеты в точках в океане, в которых находились более удаленные станции *DART*. Использовался ряд реконструированных данных станции *DART 21419* длительностью 16 мин от начала землетрясения (рис. 2, *a*, *справа*). Результаты для некоторых станций представлены на рис. 2, *b* (*слева*). Наблюдается хорошее совпадение головных волн реальных и расчетных волновых форм.

Цунами зарегистрировано мареографами в Южно-Курильске, Ханасаки и Кусиро. Построение передаточных функций для пунктов на Курильских о-вах и о. Хоккайдо начиналось через 7–11 мин после возникновения землетрясения (момент получения данных о координатах эпицентра) и завершалось до прохода первой четверти периода цунами через точку 21419 (16 мин после начала землетрясения). Прогноз для выбранных пунктов по реконструированным данным *DART 21419* длительностью 16 мин представлен на рис. 2, *b* (*справа*).

В Северо-Курильске регистрация цунами не производилась. Согласно расчету, ожидаемое цунами не представляло серьезной опасности. Какие-либо свидетельства о проявлении цунами в Северо-Курильске отсутствуют. В Южно-Курильске, хотя структуры расчетной и фактической волн не совпадают, значения максимальных амплитуд находятся в неплохом согласии, до 0,5 м, что свидетельствует о незначительном цунами, не представляющем опасности. Вполне хорошее совпадение реальных и расчетных волновых форм наблюдается для Ханасаки и Кусиро.

Более ранний, чем в Южно-Курильск, приход цунами в Ханасаки и Кусиро объясняется тем, что волна в эти пункты распространяется над глубоководной впадиной, в то время как в Южно-Курильск – над более мелководными шельфом и проливом.

При выработке прогноза по данным станции *DART 21419* в момент времени 16 мин от начала землетрясения заблаговременность прогноза для Северо-Курильска и Южно-Курильска составляет 66 и 94 мин соответственно.

Этого времени достаточно для принятия решения о необходимости объявления тревоги цунами. Момент объявления тревоги не регламентирован, но практика показывает, что для населенных пунктов Курильских островов тревога может объявляться за 30 мин до ожидаемого прихода цунами.

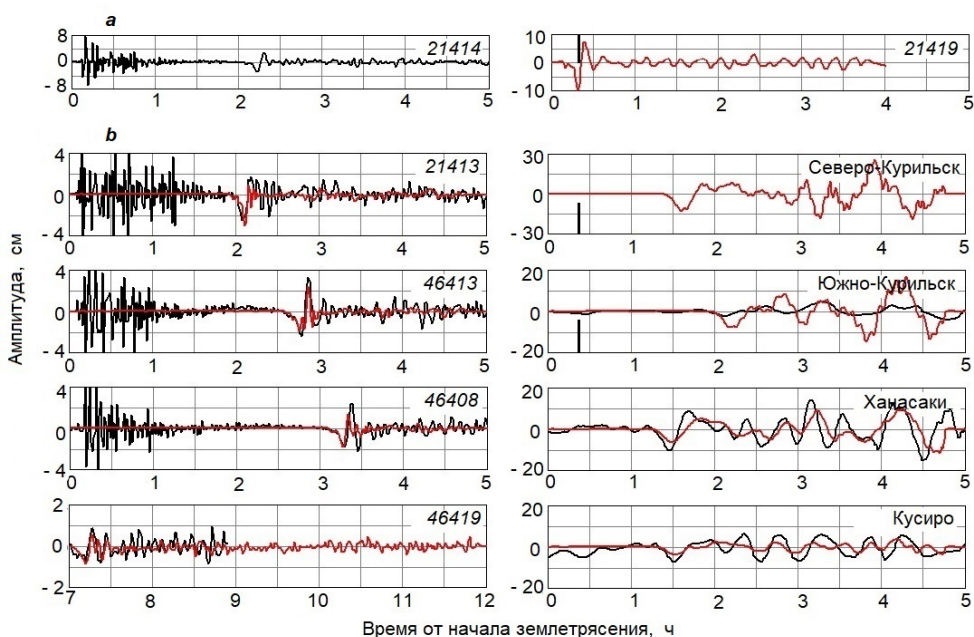
#### *Симуширское цунами 2007 г.*

Спустя два месяца произошло землетрясение на восточном склоне Курило-Камчатского желоба примерно в 170 км юго-восточнее о. Симушир 13.01.2007<sup>6</sup>.

В этом событии цунами зарегистрировано станциями вдоль Алеутских о-вов, Западного побережья США до п-ова Калифорния<sup>9</sup>. Кроме того, цунами зарегистрировано станцией *DART 21413*, находившейся к югу от очага. По данным станции *DART 21414* (рис. 3, *a*, *слева*) реконструирована форма цунами в точке 21419, где впоследствии установлена станция *DART 21419*, пробег волны до которой составляет 15 мин. Результаты реконструкции представлены на рис. 3, *a* (*справа*).

По реконструированной в точке 21419 форме цунами выполнены расчеты в точках в океане, в которых находились более удаленные станции *DART*. Использовался ряд длительностью 19 мин от начала землетрясения. Результаты для некоторых станций представлены на рис. 3, *b* (слева). Получено хорошее совпадение головных волн реальных и расчетных волновых форм как в восточном, так и в южном направлении от очага цунами. Во всех случаях вступление цунами начинается с понижения уровня океана.

Цунами зарегистрировано мареографами в Южно-Курильске, Ханасаки и Кусиро. Как и для предыдущего события, построение передаточных функций для пунктов на Курильских о-вах и о. Хоккайдо начиналось через 7–11 мин после возникновения землетрясения и завершалось до прохода первой четверти волны цунами через точку 21419 (19 мин после начала землетрясения).



**Р и с. 3.** Волновые формы симуширского цунами 2007 г.: *a* – зарегистрированная станцией *DART* 21414 (слева) и реконструированная на станции *DART* 21419 (справа); *b* – зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по реконструированным данным станции *DART* 21419

**Fig. 3.** Waveforms of the 2007 Simushir tsunami: *a* – recorded by the *DART* 21414 station (left) and reconstructed at *DART* 21419 station (right); *b* – recorded (black line) and computed (red line) based on the reconstructed data from *DART* 21419 station

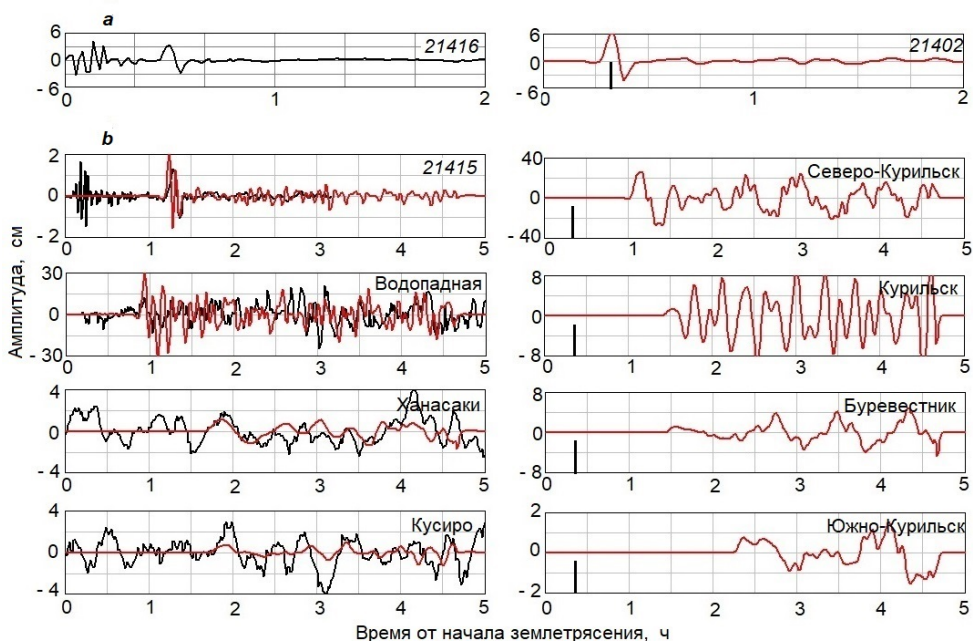
В Северо-Курильске, как и во время предыдущего события, регистрация цунами не производилась. Согласно расчету, ожидаемое цунами не представляло серьезной опасности. Свидетельства о проявлении цунами в районе Северо-Курильска отсутствуют. В Южно-Курильске, хотя структуры расчетной и фактической волн не совпадают, значения максимальных амплитуд находятся в неплохом согласии, до 0,1 м, что свидетельствует о незначительном

цунами, не представляющем опасности. Достаточно хорошее совпадение реальных и расчетных волновых форм наблюдается для Ханасаки и Кусиро.

При выработке прогноза в момент времени 19 мин от начала землетрясения заблаговременность прогноза для Северо-Курильска и Южно-Курильска составляет 69 и 101 мин соответственно.

#### *Онекотанское цунами 2020 г.*

Землетрясение восточнее о. Онекотан, в 220 км от о. Парамушир (северные Курильские о-ва) произошло 25.03.2020<sup>6</sup>. Возникшее слабое цунами зарегистрировано станциями *DART 21415*, *21416* и *21419*<sup>9</sup>, а также автоматизированным постом измерения уровня моря (АП) «Водопадная»<sup>10</sup>. Ближайшей к очагу являлась станция *DART 21416* (рис. 1), пробег цунами до которой составил 25 мин. Наиболее близким к очагу цунами из указанных на рис. 1 является положение ранее действовавшей российской станции *DART 21402*. Пробег цунами до этой точки составляет около 15 мин. Прогноз цунами по данным этой станции мог быть получен раньше, чем по данным станции *DART 21416* [15].



**Р и с. 4.** Волновые формы онекотанского цунами 2020 г.: *a* – зарегистрированная станцией *DART 21416* (слева) и реконструированная на станции *DART 21402* (справа); *b* – зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по реконструированным данным станции *DART 21402*

**Fig. 4.** Waveforms of the 2020 Onkotan tsunami: *a* – recorded by *DART 21416* station (left) and reconstructed at *DART 21402* station (right); *b* – recorded (black line) and computed (red line) based on the reconstructed data from *DART 21402* station

Реконструкция волновой формы цунами в точке *21402* выполнена экспресс-методом по данным станции *DART 21416* (рис. 4, *a*). Восстановленная

форма цунами на станции *DART 21402* приведена на рис. 4, *a* (справа). Расчет волновых форм цунами (по готовой передаточной функции) в заданных пунктах мог быть произведен сразу после получения данных станции *DART 21402* о прохождении первой четверти периода цунами (на 20-й минуте после начала землетрясения). Расчет цунами по реконструированному ряду данных станции *DART 21402* (рис. 4, *a*) длительностью 20 мин выполнялся для станции *DART 21415* и АП «Водопадная» (юго-восток Камчатки) (см. рис. 1, *a*) и населенных пунктов (рис. 1, *b*). Результаты расчета приведены на рис. 4, *b*. Получено неплохое соответствие расчетных и зарегистрированных волн на станции *DART 21415*. Колебания, предшествующие цунами на записях этой станции, являются эффектом волн Рэля на океанском дне. Неплохое соответствие амплитуд получено между расчетной формой волны вблизи АП «Водопадная» и записью, полученной этим постом [15].

По результатам расчетов, ожидаемое время прихода первой волны в Северо-Курильск равно 69 мин после начала землетрясения, расчетная амплитуда равна 15 см. Амплитуда 15 см получена в ближайшем к берегу узле разностной сетки, где глубина моря равна 17 м. В соответствии с известным законом Грина, согласно которому амплитуда волны  $a_1$  на глубине  $D_1$  связана с амплитудой  $a_0$  на глубине  $D_0$  соотношением  $a_1/a_0 = (D_0/D_1)^{1/4}$ , пересчет амплитуды 15 см в точке, в которой глубина равна 1 м, дает величину амплитуды около 30 см. Визуальная оценка высоты волны (от гребня до впадины) 50 см сделана в 1,2 км южнее порта Северо-Курильск вблизи уреза воды при глубине около 1 м [15]. Отсутствие инструментальных измерений уровня моря в Северо-Курильске, как и на всех Курильских о-вах, не позволяет подтвердить ни визуально оцененную высоту цунами 50 см, ни расчетную амплитуду 30 см.

Согласно расчетам, в других населенных пунктах Курильских о-вов амплитуда ожидаемого цунами должна быть незначительной.

Заблаговременность прогноза по данным станции *DART 21402*, составляющая для Северо-Курильска 43 мин, для Курильска 65 мин, для Буревестника 65 мин и для Южно-Курильска 116 мин, вполне достаточна для принятия решения об объявлении тревоги в этих пунктах [15].

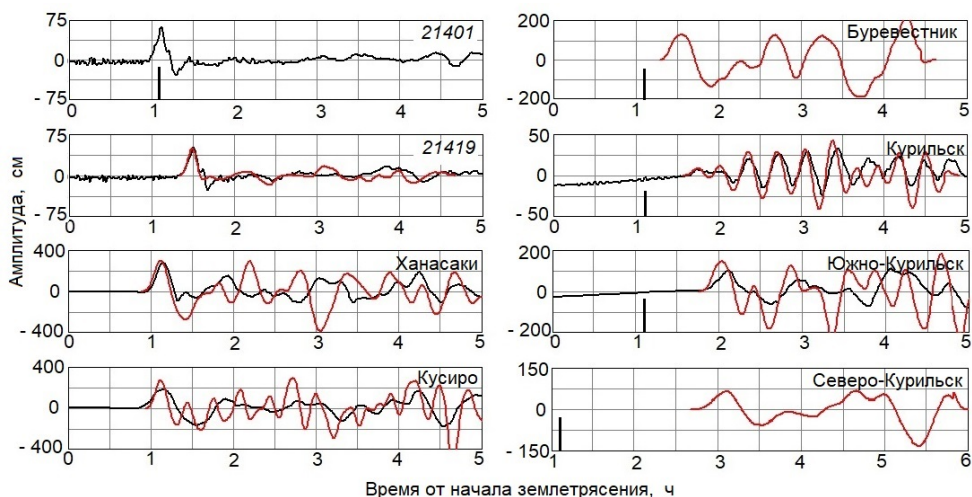
Предупреждение, выпущенное ЯМА, о возможных разрушительных волнах на Курильских о-вах с амплитудами 1–3 м не подтвердилось. Событие 25.03.2020 показывает, что способ прогноза цунами, основанный на магнитудном критерии, предварительных расчетах, на который опирается ЯМА, не всегда может давать верный прогноз.

#### *Цунами Тохоку 2011 г.*

Сильнейшее землетрясение 11 марта 2011 г. произошло у северо-восточного побережья о-ва Хонсю<sup>6</sup>. Возникшее цунами было необычным: его амплитуда превышала величину, предсказываемую расчетами для землетрясения с магнитудой 9,0. Первоначальная амплитуда волны, возникшей после главного толчка, составляла 2 м. Спустя 11 мин она неожиданно увеличилась до 5 м [18]. Качественное объяснение этого эффекта дано в [23]. Предположительно, он аналогичен эффекту подводного оползня.

В районе Курильских о-вов цунами зарегистрировано станциями *DART 21419* и российской *21401*<sup>9</sup>, береговыми мареографами в Курильске и Южно-Курильске, а также в Ханасаки и Кусиро на о. Хоккайдо<sup>11</sup>.

Расчеты выполнялись по данным станции *DART 21401* длительностью 68 мин, включающим первую четверть периода волны (рис. 5).



**Р и с. 5.** Волновые формы цунами Тохоку 2011 г.: зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по данным станции *DART 21401*

**F i g. 5.** Waveforms of the 2011 Tohoku tsunami: recorded (black line) and computed (red line) based on the data from *DART 21401* station

Получено хорошее совпадение расчетной и фактической форм волны на ближайшей к островам станции *DART 21419* (рис. 5). Качество прогноза экспресс-методом на этой станции и качество расчетов волновых форм цунами в океане, выполненных способом *NOAA*, сопоставимо<sup>12</sup>. Результаты расчета формы волны цунами вблизи населенных пунктов Курильских о-вов и о. Хоккайдо представлены на рис. 5.

Хорошо соответствуют друг другу расчетные и зарегистрированные волновые формы цунами в Ханасаки и Кусиро. В Южно-Курильске также наблюдается согласие между модельными и реальными формами волн. Совпадают время прихода цунами в точку прогноза, структура волны. Согласно прогнозу, амплитуда максимальной волны не должна превышать 1,5 м. В Курильске (охотская сторона о. Итуруп) хорошо совпадают структура, амплитуды и характерные периоды волн. В Северо-Курильске расчетный размах колебаний уровня не должен превышать 1,5 м, что согласуется с информацией судов, стоявших вблизи Северо-Курильска, где уровень воды под килем колебался от 4,2 до 2,6 м с разницей 1,6 м [18]. Расчетные амплитуды волн (до 2 м) соответствуют визуальным наблюдениям в портпункте Буревестник (о. Итуруп) [12].

<sup>12</sup> NOAA Center for Tsunami Research. Tohoku (East Coast of Honshu) Tsunami, March 11, 2011. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/> (дата обращения: 19.06.2024).



Заблаговременность прогноза составляет для Северо-Курильска 92 мин, для Южно-Курильска 37 мин, для Курильска 30 мин. Она вполне достаточна для принятия решения об объявлении тревоги цунами. Тревоги цунами могли бы объявляться последовательно в Курильске, Южно-Курильске и в Северо-Курильске. Ввиду малой амплитуды ожидаемой волны в Курильске, тревога могла бы не объявляться или быть своевременно отменена, если объявлялась по магнитудному критерию. Для портпункта Буревестник время прихода волнового фронта практически совпадает с моментом выработки прогноза. Для этого пункта, а также пунктов на о. Шикотан и островах Малой Курильской гряды тревога цунами должна объявляться, в соответствии с действующим регламентом, по магнитудному критерию. При расчетах, выполненных в работе [18], использовались данные станции *DART 21401* длительностью 20 мин (первый период волны), приход цунами оценивался как вступление первого гребня волны. Этим объясняется разница в оценке заблаговременности.

Результаты эксперимента подтверждают, что, несмотря на аномальный механизм возбуждения цунами Тохоку 11.03.2011, расчет, выполненный по данным станции измерения уровня *DART 21401* с использованием информации только о координатах эпицентра землетрясения без привлечения дополнительной сейсмологической информации, дает адекватный результат.

### Обсуждение

В работе показано, что прогноз цунами на Курильских о-вах, основанный на магнитудно-географическом способе, используемом российскими СПЦ, является неэффективным. Тревоги цунами, объявляемые одновременно на всех Курильских о-вах, нередко оказываются фактически ложными в населенных пунктах ввиду малой амплитуды волны. Однако причиной этого являются не действия Центра цунами, а утвержденный регламент, опирающийся на магнитудный критерий. Консультативный центр по цунами в северо-западной части Тихого океана (ЯМА), опирающийся на предварительно рассчитанные мареограммы от ряда источников в цунамигенных зонах с наиболее вероятными механизмами землетрясений, также не всегда может давать верный прогноз.

В настоящее время эффективными являются гидрофизические способы, использующие информацию о сформировавшемся цунами в открытом океане. Способ *NOAA (SIFT)* с использованием данных станций *DART* успешно применяется для прогноза цунами в США. Но большую сложность прогноза представляют случаи возникновения цунами вблизи побережий. Часто информация о цунами со станций *DART* поступает позднее, чем цунами достигает ближайших побережий.

Как отмечено выше, способ *NOAA* не может быть применен для прогноза цунами на Курильских о-вах. Для таких ситуаций может быть применен экспресс-метод краткосрочного прогноза цунами. Для выполнения прогноза экспресс-методом требуется сейсмологическая информация только о координатах эпицентра землетрясения и информация о цунами от станций *DART*, получаемая в режиме реального времени.

Момент выработки прогноза определяется временем (от начала землетрясения) прохождения цунами через точку регистрации. Прогноз для кон-

кретного пункта будет успешным, если его заблаговременность не меньше времени, необходимого для эвакуации населения, своего для каждого пункта. Для пунктов на Курильских о-вах заблаговременность прогноза может оцениваться не менее чем в 30 мин. Соответственно, тревога цунами может объявляться за 30 мин до ожидаемого прихода цунами в соответствующий пункт. Оценка времени добега цунами до конкретного населенного пункта выполняется в оперативном режиме. Если заблаговременность прогноза ниже 30 мин, тревога цунами должна объявляться по магнитудному критерию. Тревога может быть своевременно отменена при поступлении информации о неопасности цунами.

Целью работы являлось исследование возможности оперативного прогноза цунами на Курильских о-вах по данным о цунами в открытом океане. Рассмотрены цунами 2006–2020 гг., произошедшие вблизи Курильских о-вов. Показано, что при оперативном получении информации о координатах эпицентра землетрясения и о цунами в океане оперативный прогноз цунами в населенных пунктах возможен с необходимой заблаговременностью. Несмотря на приближенный характер, экспресс-метод позволяет адекватно оценивать степень опасности ожидаемого цунами для любого участка побережья. При этом достаточно информации о прохождении четверти первого периода цунами через станцию регистрации, находящуюся в оптимальном для каждого события месте. В случаях землетрясений в районе центральных Курильских о-вов оптимальным является положение станции *DART 21419*. Заблаговременность прогноза для населенных пунктов северных и южных островов составляет 66–101 мин. При землетрясениях в районе северных Курильских о-вов оптимальным является положение ранее действовавшей российской станции *DART 21402*. Заблаговременность прогноза в таких случаях составляет 43–116 мин. При землетрясениях у восточного побережья Японии ранее действовавшая российская станция *DART 21401* позволяла бы выполнять прогноз в оперативном режиме. Заблаговременность прогноза цунами в этих событиях составляет 30–92 мин для ближних и более удаленных населенных пунктов.

### **Заключение**

Цунамиопасными в Сахалинской области являются многие районы, в особенности Курильские о-ва. Проблема оперативного прогноза цунами в настоящее время не является окончательно решенной. Объявление тревоги цунами на Тихоокеанском побережье России основано на магнитудном методе, созданном в середине прошлого века. Имеет место большое количество (свыше 75 %) ложных тревог. Эти тревоги, объявляемые часто с излишней заблаговременностью, сопровождаются ущербом, вызванным остановкой производства, другой деятельности в прибрежной зоне на длительное время.

В настоящее время на Дальнем Востоке России гидрофизическая подсистема СПЦ, которая осуществляла бы наблюдения за волновым режимом в океане и оценивала опасность цунами, отсутствует. СПЦ нуждается в создании такой подсистемы с целью повышения оперативности, надежности и достоверности предупреждений о цунами.

Для побережья Российского Дальнего Востока может быть применен экспресс-метод оперативного прогноза цунами. Реализация экспресс-метода оперативного прогноза цунами в виде единого комплекса при условии получения информации о цунами в океане позволит в перспективе повысить качество прогнозирования и тем самым уменьшить количество ложных тревог цунами на Курильских о-вах. Действовавшие ранее российские станции *DART 21401* (в 2010–2014 гг.) и *DART 21402* (в 2012–2017 гг.) могли бы обеспечивать с достаточной заблаговременностью достоверный прогноз цунами на Курильских о-вах в случаях землетрясений в районах северных, центральных Курильских о-вов, восточного побережья Японии.

Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами. Возникает необходимость создания собственных российских глубоководных станций измерения уровня океана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bernard E., Titov V.* Evolution of tsunami warning systems and products // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373. 20140371. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0371>
2. *Tsunamis: bridging science, engineering and society / U. Kanoglu [et al.]* // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373. 20140369. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0369>
3. *Королёв Ю. П.* Оценка эффективности экспресс-метода оперативного прогноза на примерах перуанского (2007 года), чилийских (2010, 2014 и 2015 годов) цунами // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 3. С. 342–358. EDN JQDHES. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-3-342-358>
4. *Korolev Yu. P.* An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 11, iss. 11. P. 3081–3091. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011>
5. *Gusiakov V. K.* Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168, iss. 11. P. 2033–2041. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2>
6. *Гусяков В. К.* Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57, № 9. С. 1601–1615. <https://doi.org/10.15372/GiG20160901>
7. *Allen S. C. R., Greenslade D. J. M.* A Pilot Tsunami Inundation Forecast System for Australia // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. Vol. 173. P. 3955–3971. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1392-y>
8. Опыт модернизации российской системы предупреждения о цунами / А. В. Фролов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 6. С. 5–21. EDN OYSKXF.
9. Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART® buoy data / D. B. Percival [et al.] // *Natural Hazards*. 2011. Vol. 58, iss. 1. P. 567–590. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9688-1>
10. *Titov V. V.* Tsunami forecasting // *Tsunamis*. Cambridge, MA ; London, England : Harvard University Press, 2009. P. 367–396. (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas ; vol. 15).
11. *Voronina T. A., Voronin V. V.* Data selection method for restoring a tsunami source form // *Геосистемы переходных зон*. 2023. Т. 7, № 3. С. 292–303. <https://doi.org/10.30730/trz.2023.7.3.292-303>

12. *Кайстренко В. М., Шевченко Г. В., Ивельская Т. Н.* Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. на тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 1. С. 41–64.
13. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Б. В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419, № 1. С. 118–122.
14. Field Survey and Geological Effects of the 15 November 2006 Kuril Tsunami in the Middle Kuril Islands / В. Т. Macinnes [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2009. Vol. 166. P. 9–36. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0428-3>
15. *Королев Ю. П., Королев П. Ю.* Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онкотанского цунами 25.03.2020 // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4, № 2. С. 259–265. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265>
16. Новые данные о проявлениях цунами на тихоокеанском побережье России по инструментальным измерениям 2009–2010 гг. / Г. В. Шевченко [и др.] // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438, № 6. С. 823–828. EDN NXQPHF.
17. The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia / G. Shevchenko [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2013. Vol. 170. P. 1511–1527. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0562-9>
18. *Королев Ю. П., Ивельская Т. Н.* Совершенствование оперативного прогноза цунами и тревоги цунами. Анализ последних цунами // Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9, № 2. С. 76–91.
19. *Королев Ю. П., Храмушин В. Н.* Об оперативном прогнозе цунами 1 апреля 2014 г. вблизи побережья Курильских островов // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 86–93. EDN VSZHUD.
20. Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchatka and Kuril Islands // M. Lavrentiev [et al.] // Science of Tsunami Hazards. 2019. Vol. 38, no. 1. P. 1–13. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHVVol38N1Y2019.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).
21. *Smith W. H. F., Sandwell D. T.* Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1994. Vol. 99, iss. B11. P. 21803–21824. <https://doi.org/10.1029/94JB00988>
22. *Smith W. H. F., Sandwell D. T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. Vol. 277, iss. 5334. P. 1956–1962. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>
23. *Pararas-Carayannis G.* Tsunamigenic Source Mechanism and Efficiency of the March 11, 2011 Sanriku Earthquake in Japan // Science of Tsunami Hazards. 2011. Vol. 30, no. 2. P. 126–152. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHVVol30N2Y2011.pdf> (дата обращения: 15.06.2024).

*Об авторе:*

**Королёв Юрий Павлович**, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16), кандидат физико-математических наук, доцент, член Русского географического общества, **SPIN-код: 8002-5020, ORCID ID: 0000-0002-7068-7341, Yu\_P\_K@mail.ru**

## Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера «Морского гидрофизического журнала» можно оформить по Интернет каталогу «Пресса по подписке» (индекс 93632).

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»  
Тел.: +7 (8692) 54-02-23  
Сайт «Морского гидрофизического журнала»: мфж.рф  
*Physical Oceanography* (англоязычная версия): <http://www.physical-oceanography.ru>  
E-mail: [journal@mhi-ras.ru](mailto:journal@mhi-ras.ru)

Редакторы: Н. Б. Мороз, Л. Г. Анисимова  
Компьютерная верстка: Л. А. Иванчик  
Перевод: Т. А. Кузнецова, Е. Е. Петрова, Д. Б. Галаев  
Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников  
Дизайн обложки: П. В. Поликарпов

---

Подписано в печать 15.10.2024 г. Дата выхода в свет 31.10.2024 г. Формат 70 × 108<sup>1/16</sup>.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отг. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.  
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

---

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов Павел Иванович. ИНН 366411965235  
394052, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, дом 27, кв. 56