ISSN 2073-6673 (Print) ISSN 2782-5221 (Online)

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

CAHKT-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН ST. PETERSBURG RESEARCH CENTER OF RAS

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА

TOM 17, № 4 2024

FUNDAMENTAL AND APPLIED HYDROPHYSICS

VOL. 17, No. 4 2024

https://hydrophysics.spbrc.ru

Учредители: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА

Том 17 № 4 2024

Основан в 2008 г.

Выходит 4 раза в год ISSN 2073-6673 (Print) ISSN 2782-5221 (Online)

Журнал издается под руководством Отделения наук о Земле РАН

Главный редактор

Член-корреспондент РАН Анатолий Александрович Родионов

Журнал входит в Перечень ВАК для опубликования работ соискателей ученых степеней по специальностям:

1.3.6. Оптика (физико-математические науки)
1.3.7. Акустика (технические науки)
1.6.17. Океанология (физико-математические науки)
1.6.17. Океанология (географические науки)
2.5.17. Теория корабля и строительная механика (технические науки)

Свидетельство о регистрации печатного СМИ: ПИ № ФС77-69420 от 14 апреля 2017 г. Свидетельство о регистрации сетевого СМИ: серия Эл № ФС77-83580 от 13 июля 2022 г. Подписной индекс по интернет-каталогу «Пресса России» — 54160

> Адрес редакции и издателя: 199034, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский научный центр РАН Университетская наб., д. 5 Телефон 8(812) 328-50-66 nsgf2008@yandex.ru https://hydrophysics.spbrc.ru

> > Редактор: А. В. Сторожевых

Подготовка оригинал-макета: Н. В. Стасеева

Подписано к печати 25.12.2024 г. Дата выпуска в свет 30.12.2024 г. Формат 60 × 84¹/₈. Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,65. Тираж 50 экз. Тип. зак. № 6660.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета Петра Великого 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. Телефон 8(812) 552-77-17, 552-66-19, 550-40-14 tipog@spbstu.ru www.polytechpress.ru

© Российская академия наук, 2024

© Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 2024

© Составление. Редколлегия журнала «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», 2024

Founders: RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

SAINT-PETERSBURG RESEARCH CENTER OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

FUNDAMENTAL AND APPLIED HYDROPHYSICS

Vol. 17 No. 4 2024

Founded in 2008

Publication frequency: quarterly ISSN 2073-6673 (Print) ISSN 2782-5221 (Online)

The Journal is published under conduction of the Department of Earth Sciences RAS

Chief Editor

Corresponding Member of RAS Anatoly A. Rodionov

Certificate of registration of the journal in the form of printed media ΠИ № ΦC77-69420 of 14.04.2017 Certificate of registration of the journal in the form of online media Series Эл № ΦC77-83580 of 13.07.2022 Subscription index in the Internet-catalogue "Pressa Rossii" — 54160

> Address of the editorial office and publisher: Russia, St. Petersburg, 199034, St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences Universitetskaya Nab., 5 Phone: +7(812) 328-50-66 E-mail: nsgf2008@yandex.ru https://hydrophysics.spbrc.ru

> > Editing: A. V. Storozhevykh

Production of the original layout: N. V. Staseeva

Signed for printing: 25.12.2024. Issued: 30.12.2024. Format: $60 \times 84^{1}/_{8}$. Digital printing. Printed sheets: 14.65. Circulation: 50 pcs. Order No. 6660.

Publishing and printing center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya Ul., 29. Phone: 8(812) 552-77-17, 552-66-19, 550-40-14 tipog@spbstu.ru www.polytechpress.ru

© Russian Academy of Sciences, 2024

© Saint-Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2024

© Composition. Editorial Board of the Journal 'Fundamental and Applied Hydrophysics', 2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Алексеев Генрих Васильевич, д.г.н. (ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург)
- Белоненко Татьяна Васильевна, д.г.н. (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)
- Долин Лев Сергеевич, к.ф.-м.н. (Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород)
- Ерёмина Татьяна Рэмовна, к.ф.-м.н. (Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург)
- *Журбас Виктор Михайлович*, д.ф.-м.н. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва)
- Завьялов Петр Олегович, член-корреспондент РАН (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва)
- Зацепин Андрей Георгиевич, д.ф.-м.н. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва)

Зимин Алексей Вадимович, д.г.н. (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

- Керимов Ибрагим Ахмедович, д.ф.-м.н., академик Академии наук Чеченской Республики (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва)
- Крюков Юрий Семенович, д.т.н. (ФГУП Научно-исследовательский институт прикладной акустики, Дубна)
- Кустова Елена Владимировна, д.ф.-м.н. (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)
- Малый Владимир Владимирович, д.т.н. (Санкт-Петербургский институт информатики РАН, Санкт-Петербург)
- *Митник Леонид Моисеевич*, д.ф.-м.н. (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток)
- *Морозов Евгений Георгиевич*, д.ф.-м.н. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва)
- Пелиновский Ефим Наумович, д.ф.-м.н. (Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород)
- Рябченко Владимир Алексеевич (зам. главного редактора), д.ф.-м.н. (Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербург)
- Смирнов Валентин Георгиевич, д.и.н. (ФКУ «Российский государственный архив Военно-Морского Флота», Санкт-Петербург)
- Софьина Екатерина Владимировна (ответственный секретарь), к.ф.-м.н. (Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербург)
- *Стурова Изольда Викторовна*, д.ф.-м.н. (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск)
- Суторихин Игорь Анатольевич, д.ф.-м.н. (Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул)
- Чаликов Дмитрий Викторович, д.ф.-м.н. (Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербург)
- Широкова Вера Александровна, д.г.н. (Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- Бабанин Александр Владимирович (Мельбурнский Университет, Мельбурн, Австралия)
- Бондур Валерий Григорьевич, академик РАН (Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос», Москва, Россия)
- Вильнит Игорь Владимирович (АО Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», Санкт-Петербург, Россия)
- *Голицын Георгий Сергеевич*, академик РАН (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия)
- Гусев Андрей Вадимович (АО «Морские неакустические комплексы и системы», Санкт-Петербург, Россия)
- Дорофеев Владимир Юрьевич (АО Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», Санкт-Петербург, Россия)
- Зосимов Виктор Васильевич (ФГУП Научно-исследовательский институт прикладной акустики, Дубна, Россия)
- Коротаев Геннадий Константинович, член-корреспондент РАН (Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия)
- *Кай Мюрберг* (Финский институт окружающей среды, Хельсинки, Финляндия)
- *Нигматулин Роберт Искандерович*, академик РАН (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия)
- Пешехонов Владимир Григорьевич, академик РАН (АО Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия)
- Рудской Андрей Иванович, академик РАН (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
- Румянцев Владислав Александрович, академик РАН (Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия)
- Селезнев Игорь Александрович (АО Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия)
- *Соомере Тармо*, академик (Президент Эстонской академии наук, Таллин, Эстония)
- Филатов Николай Николаевич, член-корреспондент РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия)
- Филимонов Анатолий Константинович (АО Концерн «Морское Подводное Оружие Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия)

EDITORIAL BOARD

- *Aleksei V. Zimin.* Dr.Sci., St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
- Andrey G. Zatsepin. Dr.Sci., P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia
- *Dmitry V. Chalikov.* Dr. Sci., St. Petersburg Department of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
- *Efim N. Pelinovsky.* Dr. Sci., Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
- *Ekaterina V. Sofina* (Executive Secretary). Cand.Sci., St. Petersburg Department of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
- *Elena V. Kustova*. Dr. Sci., St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
- Evgeniy G. Morozov. Dr. Sci., P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- *Genrikh V. Alekseev*. Dr. Sci., Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
- *Ibragim A. Kerimov*, Dr. Sci., Academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic (Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
- *Igor A. Sutorikhin*. Dr. Sci., Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia
- *Izolda V. Sturova*. Dr. Sci., Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
- *Leonid M. Mitnik.* Dr. Sci., V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
- Lev S. Dolin. Cand.Sci., Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
- *Pyotr O. Zavyalov.* Corresponding member of RAS, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- Tatyana R. Yeremina. Cand.Sci., Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia
- Tatyana V. Belonenko. Dr. Sci., St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
- Valentin G. Smirnov, Dr. Sci., Russian State Naval Archives, St. Petersburg, Russia
- *Vera A. Shirokova*, Dr. Sci., S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- Victor M. Zhurbas. Dr.Sci., P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- Vladimir A. Ryabchenko (Deputy Chief Editor). Dr. Sci., St. Petersburg Department of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
- Vladimir V. Malyj. Dr. Sci., St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, St. Petersburg, Russia
- Yuri S. Kryukov. Dr. Sci., Research Institute of Applied Acoustics, Dubna, Russia

EDITORIAL COUNCIL

- Alexander V. Babanin. The University of Melbourne, Melbourne, Australia
- Anatoly K. Filimonov. JSC "Concern "Sea underwater weapon – Gidropribor", St. Petersburg, Russia
- Andrey I. Rudskoy. Academician of RAS, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
- Andrey V. Gusev. JSC "Morskiye Neakusticheskiye Kompleksy i Sistemy", St. Petersburg, Russia
- *Gennadiy K. Korotaev.* Corresponding member of RAS, Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
- *Georgy S. Golitsyn.* Academician of RAS, A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- Igor A. Seleznev. JSC "Concern "Oceanpribor", St. Petersburg, Russia
- Igor V. Vilnit. JSC "Central Design Bureau for Marine Engineering "Rubin", St. Petersburg, Russia
- Kai Myrberg. Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland
- Nikolay N. Filatov. Corresponding member of RAS, Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia
- *Robert I. Nigmatulin*. Academician of RAS, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- *Tarmo Soomere*. Academician of EAS, President of the Estonian Academy of Sciences, Tallinn, Estonia
- Valery G. Bondur. Academician of RAS, AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia
- Vladimir G. Peshekhonov. Academician of RAS, JSC "Concern CSRI Elektropribor", St. Petersburg, Russia
- Vladimir Yu. Dorofeev. JSC "St. PetersburgMarine Design Bureau "MALACHITE", St. Petersburg, Russia
- *Vladislav A. Rumyantsev.* Academician of RAS, St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
- Victor V. Zosimov. Research Institute of Applied Acoustics, Dubna, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Гидрофизические и биогеохимические поля и процессы	
<i>Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П.</i> Трансформация мезомасштабных океанически вихрей в филаменты: анализ данных альтиметрии (<i>на англ. яз.</i>)	4X 8
Исаев А. В., Рябченко В. А. Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы	32
<i>Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Исаев А.В.</i> Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1 с января по декабрь 2016—2022 гг.	43
Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Капранов И.Е., Шпилев Н.Н., Яковчук М.С. Численное и физическое моделирование генерации и эволюции вихревых колец в крупномасштабном гидрофизическом бассейне	55
Суслин В.В., Кудинов О.Б., Латушкин А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Мартынов О.В. Взаимосвязь биооптических характеристик Телецкого озера на разных горизонтах по результатам экспедиции в августе 2023 года (<i>на англ. яз.</i>)	71
Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива: натурный эксперимент в период нереста	77
Техническая гидрофизика	
Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилев Н.Н. Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов	[90
Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Лобанов А.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н. Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН	100
Родионов А.А., Никитин Д.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н., Паничева Е.Д. Гидроакустический бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова	
Российской академии наук	109
Тематический указатель 2024 (Т. 17)	122
Авторский указатель 2024 (Т. 17)	125

CONTENTS

Hydrophysical an	d biogeochemical	fields and processes
------------------	------------------	----------------------

<i>Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P.</i> Evolution of mesoscale vortices in the ocean into filaments inferred from altimeter data	8
<i>Isaev A.V., Ryabchenko V.A.</i> Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020	32
Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Konik A.A., Isaev A.V. Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January to December 2016–2022	43
Monakhov R. Yu., Rodionov A.A., Kapranov I. Ye., Shpilev N.N., Yakovchuk M.S. Numerical and physical modeling of generation and evolution of vortex rings in a large-scale hydrophysical water tank	55
Suslin V.V., Kudinov O.B., Latushkin A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Martynov O.V. Relationship of bio-optica characteristics of Lake Teletskoye at different horizons according to the results of an expedition in August 2023	ıl 1 71
Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja. Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay: A field experiment during the spawning period	77
Technical hydrophysics	
Rodionov A.A., Vankevich R.Ye., Lobanov A.A., Glitko O.V., Shpilev N.N. Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences for modeling hydrophysical processes	90
<i>Vankevich R.Ye., Rodionov A.A., Lobanov A.A., Filin K.B., Shpilev N.N.</i> Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences	100
Rodionov A.A., Nikitin D.A., Filin K.B., Shpilev N.N., Panicheva E.D. Hydroacoustic water tank of St. Petersburg	g
Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences	109
Subject index 2024 (Vol. 17)	122
Author index 2024 (Vol. 17)	125

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-1

UDC 551.468

© V. V. Zhmur¹⁻³, T. V. Belonenko^{1*}, E. V. Novoselova^{1,4}, B. P. Suetin³, 2024

 ¹St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia
 ²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia
 ³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia
 ⁴Nansen International Environmental and Remote Sensing Center Scientific Foundation, 7 Line 14 V.O.,

*Nansen International Environmental and Remote Sensing Center Scientific Foundation, 7 Line 14 V.O., St. Petersburg, 199034, Russia *btvlisab@yandex.ru

EVOLUTION OF MESOSCALE VORTICES IN THE OCEAN INTO FILAMENTS INFERRED FROM ALTIMETER DATA

Received 27.08.2024, Revised 11.11.2024, Accepted 27.11.2024

Abstract

Satellite remote sensing techniques offer a wealth of optical, infrared (IR), and radar images of the ocean surface, where we can observe numerous elongated vortex structures known as filaments. These filaments become readily visible in the imagery due to the presence of surfactant films and/or floating algae clusters on the sea's surface. Given their elongated form, automated vortex identification methods do not readily distinguish filaments from vortices. Nevertheless, both filaments and vortices exhibit notable characteristics such as high relative vorticity and kinetic energy. The process by which vortices transform into filaments is a result of their interaction with spatially non-uniform background currents. In this study, we apply the theoretical principles regarding the stretching of mesoscale ocean vortices to real ocean conditions, inferred from altimeter data. The primary objective of this research is to assess the proportion of mesoscale ocean vortices that undergo stretching to become filaments, consequently facilitating the redistribution of energy from the mesoscale to the submesoscale. We provide a total assessment of the portion of the World Ocean's surface where mesoscale vortices undergo significant stretching. We present maps that indicate the geographical distribution of regions where vortex stretching is not restricted and offer an interpretation of the findings. The reduction in the inherent energy of vortices due to the stretching induced by the background flow is explained as a potential mechanism for energy transfer from the vortex to the flow, possibly leading to the manifestation of the negative viscosity effect within this system.

Keywords: mesoscale vortices, filaments, elongation, ellipsoid, energy, negative viscosity

УДК 551.468

© В. В. Жмур¹⁻³, Т. В. Белоненко^{1*}, Е. В. Новоселова^{1,4}, Б. П. Суетин³, 2024

¹Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва ³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская область

⁴Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», 199034, 14 линия В.О., д. 7, г. Санкт-Петербург

*btvlisab@yandex.ru

ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ В ФИЛАМЕНТЫ: АНАЛИЗ ДАННЫХ АЛЬТИМЕТРИИ

Статья поступила в редакцию 27.08.2024, после доработки 11.11.2024, принята в печать 27.11.2024

Аннотация

Спутниковые данные дистанционного зондирования предоставляют обширный массив оптических, инфракрасных (ИК) и радиолокационных изображений поверхности океана, на которых видны многочисленные вытянутые вихревые структуры — филаменты. Их высокая контрастность на изображениях обусловлена наличием поверхностно-активных пленок и/или скоплений водорослей. Из-за вытянутой формы филаменты трудно отличить от вихрей с помощью автома-

Ссылка для цитирования: *Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П.* Трансформация мезомасштабных океанических вихрей в филаменты: анализ данных альтиметрии // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. 8–31. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-1

For citation: Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Evolution of Mesoscale Vortices in the Ocean into Filaments Inferred from Altimeter Data. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):8–31. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-1

тизированных методов идентификации. Однако и филаменты, и вихри характеризуются высокой относительной завихренностью и кинетической энергией. Трансформация вихрей в филаменты обусловлена взаимодействием с неоднородными фоновыми течениями. В данном исследовании применяется теоретическая модель растяжения мезомасштабных океанических вихрей к реальным данным альтиметрии. Цель исследования — оценить долю мезомасштабных вихрей, претерпевающих растяжение и трансформирующихся в филаменты, что приводит к перераспределению энергии с мезомасштаба на субмезомасштаб. Оценивается глобальное пространственное распределение областей с неограниченным и ограниченным растяжением мезомасштабных вихрей и интерпретируются полученные результаты. Уменьшение энергии вихрей за счет растяжения, вызванного фоновым потоком, рассматривается как потенциальный механизм передачи энергии от вихря к потоку, что может проявляться в виде эффекта отрицательной вязкости.

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, филаменты, вытягивание, эллипсоид, энергия, отрицательная вязкость

1. Introduction

Mesoscale eddies play a vital role in horizontal and vertical water exchange, influence the spatial distribution of oceanographic parameters, and have a substantial impact on bioproductivity [1]. The existence of ocean eddies, such as those found in the Gulf Stream or Kuroshio, has been known to humanity for an extended period. However, advancements in measurement technology have enabled both direct and indirect assessments of these formations in the World Ocean only since the latter half of the 20th century. This progress occurred with the involvement of specialized research vessels equipped for the study of these phenomena. The true surge in the exploration of mesoscale eddies began following scientific ocean experiments such as POLYGON-70 in the North Atlantic, MODE (Sargasso Sea, 1973), POLYMODE (North Atlantic, 1977–1978), MESOPOLYGON (North Atlantic, 1985), and MEGA-POLIGON (Pacific Ocean, 1987). These expeditions sparked widespread interest in the global scientific community for both experimental and theoretical investigations of oceanic vortex formations with horizontal dimensions ranging from a few tens of kilometers to 100–200 km.

Mesoscale eddies within the ocean play a pivotal role in transferring the energy of water movement and in shaping the variability of hydrophysical and hydrochemical fields across the ocean's scale spectrum [2]. With the discovery of mesoscale eddies, the prior concept of the ocean as a relatively stable entity in space and time gave way to a new understanding. According to this perspective, the primary energy of sea water movement is concentrated within eddies, rather than in the average circulation of the ocean.

Criteria and detection algorithms have been developed for eddies, which are considered closed formations. The rapid advancement of remote sensing techniques, especially altimetry products, along with the increased computational capabilities, has spurred the rapid development of automated algorithms for detecting and tracking eddies. The significance of these algorithms lies in their ability to shift from analyzing the areal characteristics of vortex processes, such as vortex kinetic energy, to examining specific vortex parameters like radius, amplitude, orbital velocity, lifetime, and movement velocity.

Despite their diverse approaches, automated eddy identification and tracking methods can be categorized into three general groups: physical, geometric, and hybrid [3]. In physical methods, criteria are directly derived from the values of the initial field. Geometric methods, on the other hand, focus exclusively on the geometric characteristics of isolines in the initial parameter when selecting vortices. Mixed algorithms, as the name suggests, differentiate vortices based on both the physical values and geometric characteristics of the initial field.

However, the ability of all these methods to distinguish filaments within oceanographic fields is constrained, primarily by the spatial resolution of the data, and secondly, algorithmically, as these algorithms typically don't differentiate elongated structures like filaments. This may explain the relatively lower interest of oceanographers in filaments compared to eddies.

Filaments become discernible in optical, infrared, and radar images of the ocean surface owing to the presence of surfactant films and/or floating algae on the sea surface (please refer to Fig. 1 for ocean filaments). Temperature anomalies in filaments often serve as crucial mechanisms for generating light/dark patterns in radar images [4]. One of the mechanisms contributing to filament formation is the transformation of vortices through stretching under the influence of spatially non-uniform background flows when one of the horizontal scales becomes several times larger than the other. For instance, this transformation of a vortex is illustrated in [5]. In their study, the authors analyzed the evolution of a mesoscale eddy in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea during April 3–24, 2012. Initially, a vortex with a roughly circular shape undergoes deformation to the extent that its length becomes at least four times greater than its width. This signifies the transformation of the vortex into a filament. During this process, the kinetic energy decreases by a factor of three, the potential energy diminishes by an average of 1.7 times, and the overall energy of the vortex decreases by a factor of 2.3 [6].



Fig. 1. Examples of filament occurrences in the White Sea, as observed in the Envisat ASAR radar image taken on June 24, 2010, at 08:11. UTC. © ESA

Another instance of such a transformation can be observed in [7] (for the animation, please refer to https://link. springer.com/article/10.1007/s00024-020-02647-1). The animation illustrates the process of filaments emerging from initially circular eddies that encircle the quasi-permanent anticyclonic Lofoten eddy in the Norwegian Sea.

Based on in-field observations and principles of fluid dynamics, an oceanic vortex consists of two main components: a central vortex core and a mass of seawater surrounding this core. The surrounding water also rotates in alignment with the core but at progressively slower speeds as it moves away from the core's outer edge. The orbital velocity in the core of the vortex increases as it moves away from the center of the core. It is maximal at the core boundary and decreases outside the core. Inside the eddy's core lies seawater that was trapped during the formation of the vortex, characterized by significantly higher vorticity compared to the surrounding background flow. An apt comparison for the core of a vortex is to imagine it as a "water-filled pocket." The core of the vortex moves harmoniously with the water in its immediate vicinity, which is why vortices have the capacity to transport water over considerable distances. The core's shape, usually delineated by its outer boundary, often experiences rotational changes, and the core itself can undergo deformation [8–12].

For ocean eddies with horizontal dimensions roughly equal to or larger than the inner Rossby deformation radius, the concept of potential vorticity conservation remains valid. Put simply, when these eddies travel, the individual particles inside them preserve their potential vorticity. This principle essentially reflects the conservation of angular momentum for fluid particles within a layered, rotating ocean environment.

1.1. Historical background

In 1899, the Russian scientist S.A. Chaplygin published a paper that investigated how a two-dimensional Kirchhoff vortex is deformed when subjected to a constant shear flow [13] (see also in [14]). Subsequently, these studies were further advanced in the field of planar hydrodynamics by Kida [15]. Later, generalizations of Kirchhoff's solution were proposed for a two-dimensional elliptical vortex with a piecewise-constant vorticity distribution [16]. Additionally, an approximate analytical solution was derived, accurate up to second order in a small Rossby number expansion, describing the shape of an arbitrarily oriented ellipsoid in an external flow with linear shear [17]. These works were extended to three-dimensional vortices by V.V. Zhmur [18] and also [19, 20]. These works delve into the dynamics of ellipsoidal vortices under various background conditions.

1.2. Ellipsoidal approximation of mesoscale vortices

In our study, we will approximate vortices with a co-rotating core in the form of an ellipsoid with two horizontal axes and one vertical axis. This is a more general form of vortex core than the traditional circular one. In the special case where the horizontal semi-axes of the ellipsoid coincide, our vortices become axisymmetric. The approach with ellipsoidal vortices allows us to investigate the deformation of vortices by external background flows. The problem of the behavior of ellipsoidal vortices in background barotropic flows was formulated and partially solved in the works [21, 22, 18], where it was shown that there are three regimes of behavior for such vortex cores. In two of these regimes, the vortex remains localized in the horizontal plane, undergoing periodic limited shape oscillations, specifically changes in the lengths of the horizontal semi-axes. In these regimes, the core shape rotates or oscillates around the vertical axis.

When a vortex undergoes deformation, its boundary can display three distinct behaviors: rotation, nutation oscillations, and unbounded elongation. In the first two scenarios, the eddy retains its localized structure. However, in the third case, one of its axes stretches infinitely while the other shrinks to zero. In the horizontal plane, such a vortex takes on the appearance of a vortex filament.

1.3. Stretching of a mesoscale vortex

We define the stretching of a mesoscale vortex as the process in which it elongates in a manner where its lengthwise dimension becomes greater than its width. The behavior of a vortex varies depending on whether it is within a barotropic background flow or a flow with vertical shear. In the presence of a background flow, and under specific conditions, a vortex can be stretched into a filament as it undergoes deformation. When a vortex experiences stretching in the horizontal plane, meaning its length becomes greater relative to its width, the fluid motion generated by the vortex weakens. From a physical standpoint, the scenario of unrestricted stretching signifies the vortex's disintegration due to the flow. Of particular interest is when the vortex, while interacting with the flow, deforms and stretches into a filament.

In these regimes, particle rotation within the core occurs either clockwise or counterclockwise, depending on whether we are considering cyclonic or anticyclonic vortex formation. The evolution of the core shape does not affect the direction of particle circulation within the core but does impact their magnitudes. The third, most interesting evolution regime for vortices in currents is the unbounded stretching of vortices in the horizontal plane by background flows. This behavior is accompanied by interesting hydrophysical phenomena, leading to the formation of long and thin vortex structures in the horizontal plane. As they stretch, these structures gradually lose their vortex properties: their circulation speeds decrease, both kinetic and potential energies diminish. According to theory [23], energy decreases both within the vortex cores and in the outer zone surrounding the core. Energy losses during vortex stretching have been confirmed by observational data [6, 24]. These energy losses are not related to friction. It is natural to expect that in geographical areas where vortices stretch, the energy lost by vortices is returned to the background flow.

A rigorous mathematical substantiation of the vortex stretching mode is meticulously detailed in the works [19, 20, 12, 24]. This justification builds upon the theory of mesoscale quasi-geostrophic eddies characterized by potential vorticity in the core, which takes the form of a deformable ellipsoid. Further advancements of these concepts can be found in articles authored by David Dritschel and his students (e. g., [25–28] and related references).

When mesoscale vortices are stretched within a deforming flow background, one can expect energy transfer from vortices to filaments, and subsequently, from mesoscale to submesoscale movements. This constitutes a direct energy cascade, closely associated with the unbounded stretching of vortices into filaments. Theoretical calculations suggest that significant elongation of the vortex core can lead to a reduction in vortex energy by 20-60 % [24]. Given that the physical system comprises solely vortices and a flow, it is reasonable to anticipate that the "lost" vortex energy will be redistributed back into the flow.

Returning to the concept of an ensemble of eddies as a manifestation of geophysical turbulence, where eddies originate from the flow and subsequently engage in energetic interactions with it, this phenomenon of energy recovery from turbulence within the flow is referred to as the reverse energy cascade, or alternatively known as the "negative viscosity phenomenon" [29].

2. Research Objectives

The primary objective of this study is to elucidate the physical conditions that lead to the transformation of eddies into elongated filaments within the World Ocean. This transformation is driven by the influence of uniformly vortical

background flows, which exhibit linearity in horizontal coordinates. Additionally, we aim to quantify the proportion of mesoscale eddies undergoing this elongation process, ultimately facilitating the redistribution of energy from the mesoscale to the submesoscale.

3. Basics of the theory

The foundational principles of ellipsoidal vortex theory are comprehensively outlined in various works (see the reference list in [18]). In this approach, the change in the shape of vortex cores is associated with the deforming properties of large-scale currents, namely, the presence of a nonzero deformation coefficient in the currents. The alteration of the vortex core shapes in response to the deforming properties of the currents is a key aspect in understanding vortex evolution in hydrodynamic flows. Let's delve into this thesis in more detail.

If the characteristic horizontal size of background barotropic flows noticeably exceeds the horizontal size of vortex nuclei, then it is permissible to decompose the background flow field $\vec{u}_b(x,y) = (u_b(x,y), v_b(x,y))$ in Taylor's row in the vicinity of the vortex center $(x_0(t), y_0(t))$, where $u_b(x, y)$ and $v_b(x, y)$ are the background components of the velocity field. In this case, we can limit to linear terms in horizontal coordinates:

$$u_b(x,y) = u_b(x_0,y_0) + e_1(x-x_0) - \gamma_1(y-y_0),$$

$$v_b(x,y) = v_b(x_0,y_0) + \gamma_2(x-x_0) - e_1(y-y_0).$$
(1)

Here x and y are horizontal coordinates. The signs of the set of the coefficients $\begin{pmatrix} e_1 & -\gamma_1 \\ \gamma_2 & -e_1 \end{pmatrix}$ in (1) are chosen for con-

venience reasons for further use. In this case, the incompressibility condition $\frac{\partial u_b}{\partial x} + \frac{\partial v_b}{\partial y} = 0$ is done automatically by

default, and $(\gamma_1 + \gamma_2) = rot_z \vec{u}_b(x, y)$. The coefficients e_1, γ_1, γ_2 will change when rotating the coordinate system (x, y). However, there is always a coordinate system in which the coefficients γ_1 and γ_2 are equal, i. e. $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$. The coefficients γ_1 and γ_2 are equal, i. e. $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$.

ficient e_1 in the same coordinate system will take some value e. As a result, the matrix $\begin{pmatrix} e_1 & -\gamma_1 \\ \gamma_2 & -e_1 \end{pmatrix}$ will take a simpler

form $\begin{pmatrix} e & -\gamma \\ \gamma & -e \end{pmatrix}$. The coefficient $\gamma = \frac{1}{2} rot_z \vec{u}_b(x, y)$ is the angular velocity of rotation of the fluid particles of the back-

ground flow, and the coefficient e, called the deformation coefficient, is responsible for the deformation properties of the background flow. Such flows are called flows with equal vorticity, in which the behavior of ellipsoidal vortices was studied [21, 22, 18]. The properties of ellipsoidality and equal vorticity of background flows make it possible to write out the main physical characteristics of vortices in the form of algebraic relations, which significantly simplifies the study. In the absence of background flow, the vortex does not deform, and its shape (ellipsoid) rotates around a vertical axis with a constant angular velocity. The particles in the core overtake the rotation of the shape. The presence of a non-zero deformation coefficient e leads to a change in the shape of the core. At the same time, the vortex itself moves as a whole with the speed of an undisturbed background flow. The presence of movement as a whole has nothing to do with vortex deformation.

Then, we consider the barotropic flow $\vec{u} = (u, v, 0)$ with the linear dependence of the flow velocity on the horizontal coordinates:

$$\vec{u} = (u, v, 0) = \begin{cases} u = u_0 + ex - \gamma y \\ v = v_0 + \gamma x - ey \end{cases}.$$
(2)

Here u_0 and v_0 are the flow velocity components in the vortex center x = 0, y = 0. In such a flow, the center of the vortex moves, as a whole, with the speed of the external flow (u_0, v_0) and simultaneously rotates and deforms. We are only interested in the deformation component of the vortex evolution. The relations (2) include two flow parameters, i. e. *e* and γ . Both of them describe the inhomogeneity of the flow, i. e. the dependence of the flow on the coordinates. The coordinate system for equations (2) is chosen in such a way that the coefficients for the *y*-component of velocity (i. e. $-\gamma$) and for the *x*-component of velocity (i. e. γ) are the same in modulus, but opposite in sign, so $e = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y}$ follows from the divergence-free flow (2). This type of coordinate system can always be derived from any other coordinate system with a vertical axis *z*, where the velocity vector has an arbitrary linear relationship with the horizontal coordinates of the barotropic flow. This is achieved by rotating the coordinate system around the ver-

tical axis z. Kida [15] employed what is commonly known as the "convenient" coordinate system when investigating the evolution of the Kirchhoff vortex within the flow. The relevance of the chosen coordinate system to the general case of an arbitrary coordinate system or the traditional coordinate system used in oceanography, where the x-axis points East, the y-axis points North, and the z-axis is vertical, is clarified in Appendix III. In the case of barotropic flow, the center of the vortex moves with the velocity of the external flow, converging at the center of the ellipsoid. The vertical semi-axis (c) remains constant, while the horizontal axes undergo changes so that the product $a(t) \times b(t)$ is preserved where a is the large semi-axis, b is the small semi-axis, and c is the vertical semi-axis of the ellipsoid.

The potential vorticity of the background flow in terms of flow parameters is 2γ . The potential vorticity describes different types of flows at different ratios of *e* and γ . When $|\gamma| > |e|$, the background flow is a movement along closed current lines in the form of ellipses. When $|\gamma| = |e|$, the background flow is a rectilinear flow with a shift. When $|\gamma| < |e|$, the current lines of the background flow are a set of hyperbolas.

The problem is reduced to the evolution in time of two horizontal semi-axes of the ellipsoid a(t) and b(t), i. e. to

a system of two differential equations for the ratio of the semi-axes $\varepsilon = \frac{a}{b}$ and orientation angle θ of the larger horizontal semi-axis of the ellipsoid *a* to the coordinate axis *x* (see please proof in [18]). In the general case, the variable intrinsic angular velocity of rotation of the shape of the vortex core $\Omega(\varepsilon, K)$ depends on the horizontal elongation of the vortex core $\varepsilon = \frac{a}{b}$ and the parameter of the vertical oblateness of the vortex core $K = \frac{N}{f} \frac{c}{\sqrt{ab}}$, where *N* is the Väisälä-Brunt frequency, *f* is the Coriolis parameter, and *c* is the vertical semi-axis. The change in the core shape is a result of the deformation coefficient *e* in the background flow (1). Physically, the deformation of the core shape is attributed to the spatial non-uniformity or variability in the background flow, and σ is the excess potential vorticity of the vortex core over the potential vorticity 2γ background flow (1). A discussion about potential vorticity is given in Appendix I.

When transitioning to dimensionless variables, it becomes evident that on the phase plane (ε , sin2 θ). The trajectory of the integral curve, which describes the evolution of a vortex, is contingent on three dimensionless parameters: γ/e , σ/e and K. The advantage of utilizing a dimensionless set of variables γ/e , σ/e , and K is as follows: γ/e pertains solely to the description or characterization of the background flow, σ/e shows the relative intensity of the vortex, and K is the geometric factor that describes the vertical flatness of the vortex core. Small values K < 1 correspond to thin vortices, and large values K > 1 correspond to thick ones. When subjected to barotropic flow (1), the parameter K remains constant, even as the vortex core undergoes deformation. The deformation of the core shape is a result of the deformation coefficient "e" in the background flow (1), and it is also influenced physically by the spatial non-unifor-

mity of the background flow. When calculating the parameter $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$, only the effect of the background flow (and the

exclusion of vortex dynamics) is considered. We used the smoothing of geostrophic velocity fields by the moving average method with a window of a width of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. A moving average smoothes the data by consolidating the spatial data points into longer units of space (see please [30]).

For constant coefficients "e" and " γ ," the system of differential equations is solved using quadrature methods [18]. As a result of this solution, it is derived that any integral curve in the parameter plane (e; sin2q) describes the evolution of a specific vortex, contingent upon the background flow parameters "e" and " γ ," the vertical oblateness parameter of the vortex core "K," and the integration constant "C," subject to a physical constraint: $|\sin 2\theta| \le 1$. A rigorous mathematical derivation of the relevant formulas can be found in [18, 5, 31, 32]. It's worth highlighting that in this context, the plane (ε ; sin2 θ) is the phase plane. In the context of the flow described by formula (1), there are three possible behaviors for the shape of ellipsoidal vortices:

(1) Two periodic modes: These include the rotation mode and the mode where the core shape oscillates periodically.

(2) The mode of unlimited elongation of the core in the horizontal direction: This occurs under the influence of uniformly vortexed linear flows in coordinates.

These behaviors are observed within the plane of study.

In the realm of ellipsoidal vortex theory, we utilize a previously established map depicting the theoretical behavior of vortices in barotropic flows, employing dimensionless coordinates for convenience. A key finding from this map is the existence of a region denoting imminent vortex stretching, represented by the color purple. Rather than delving into the theory itself, we rely on it, drawing upon [5, 31, 32]. The constancy of the parameter *K* for each vortex enables us to investigate the presence of each of the three modes (rotation, nutation oscillations, and unlimited extension) characterizing vortex behavior within the parameter plane. (γ/e , σ/e). Figure 2 shows for the selected value K = 0.2 the structure of zones with different behavior of phase trajectories on the parameter plane (γ/e , σ/e). According to the theory, the parameter *K* remains constant during the evolution of vortices in barotropic flows.

Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П.

However, it can vary from one vortex to another, and it may also change over time in response to fluctuations in the Väisälä-Brunt frequency. We have chosen a characteristic value of K as 0.2, which represents a typical value for the majority of mesoscale vortices.

In the ocean, the characteristic value of the ratio N/f is approximately 20. The ratio of the vertical scale to the horizontal scale for vortices is relatively small, typically around 0.01, which means that the product of 20×0.01 equals 0.2. If the horizontal dimensions of the vortices increase, the value of *K* becomes even smaller. Conversely, decreasing the horizontal dimensions is associated with a reduction in vertical dimensions, but the overall value of *K* remains in the order of 0.2.



Fig. 2. In the parameter plane $(\sigma/e, \gamma/e)$, there are three distinct modes of behavior for vortices, and they are separated by four curves that originate in pairs from specific points with K = 0.2 [5]

These modes are as follows:

Rotation Mode: Vortices primarily exhibit rotation behavior. This mode is represented by one of the three distinct areas in the parameter plane.

Nutation Oscillation Mode: Vortices display nutation or oscillatory behavior. This mode is represented by another distinct area in the parameter plane.

Unlimited Extension (Horizontal) Mode: Vortices elongate significantly in the horizontal direction. This mode is the third distinct area in the parameter plane.

The four curves, which emerge in pairs from specific points, serve as boundaries or transitions between these three modes. These curves define the regions where one mode transitions into another. The specific coordinates and equations for these curves would be determined by the characteristics of the study and the equations governing vortex behavior.

Three distinct areas are identified along the ordinate (vertical) axis, with each area having specific characteristics or behaviors $|\gamma / e| > 1$, there are only oscillatory and rotational modes (red color, the area extends to infinity); in the area of $|\gamma / e| \le 1$, all three modes are allowed, which are separated from each other by four curves emerging in pairs

from points (0; ±1) and
$$\left(\pm \left(\frac{\sigma}{e}\right)_0, \pm 1\right)$$
.

As a result, the strip $|\gamma/e| \le 1$ is divided into three zones symmetrical concerning the origin:

• In the parameter plane, there is an external (green) region where all three modes of vortex behavior are allowed: rotational, oscillatory, and elongating. This external green region encompasses the entire parameter space, indicating that vortices within this area can exhibit any of the three modes of behavior without any specific restrictions.

• In the parameter plane, there is an intermediate (yellow) region where only two modes of vortex behavior are allowed: oscillatory and unlimited stretching. Vortices within this yellow region can exhibit either oscillatory behavior or unlimited stretching behavior, but rotational behavior is not observed in this zone.

• In the parameter plane, there is an internal (purple) region where only one mode of vortex behavior is allowed: unlimited vortex core stretching. Vortices within this purple region predominantly exhibit the behavior of elongating their core in an unlimited manner. Rotational and oscillatory behaviors are not observed within this zone.

Qualitatively, this behavior can be explained as follows:

According to the equations describing the evolution of vortices in a flow (as presented in [18]), two key factors influence the vortex shape:

(1) Intrinsic Rotation: The vortex shape inherently rotates on its own.

(2) External Flow Interaction: Additionally, the vortex shape is further twisted by the rotational component of the external flow.

The elongation of the vortex is closely related to its rotation. For the vortex to elongate continuously, it requires a significant reduction in the rotation of its shape. This reduction in rotation occurs when the signs of the potential vorticity parameter (σ) and the parameter (γ) representing the external flow's rotational component are different.

In other words, when σ and γ have opposite signs, they tend to counteract each other's rotational effects, leading to the elongation of the vortex core. This explains why the internal (purple) region in the parameter plane is associated with unlimited vortex core stretching since in this region, the signs of σ and γ are such that they minimize the rotation of the vortex's shape, allowing for its elongation.

Indeed, when the signs of the potential vorticity parameter (σ) and the parameter (γ) representing the external flow's rotational component are the same, several key behaviors result:

(1) Independent Rotation: The vortex rotates independently, maintaining its intrinsic rotational characteristics.

(2) Additional Twisting by Flow: The vortex shape is additionally twisted by the external flow in the same direction, amplifying its rotation.

As a consequence of this behavior, vortices with the same signs of σ and γ tend to reinforce their rotational tendencies, making it challenging for them to elongate indefinitely. This is why, in the parameter plane, points corresponding to vortices with the same sign of vorticity are situated in the rotation zone. This zone signifies that these vortices maintain their rotation rather than elongate significantly.

Conversely, weaker vortices with different signs of σ and γ experience a different outcome. These vortices are primarily stretched by the flow, leading to the formation of vortex filaments. Conversely, vortices with the same signs of σ and γ are not stretched significantly by deformation flows.

This phenomenon explains the presence of weaker, smaller vortices with opposite signs of vorticity in the vicinity of larger, more intense eddies. The weaker vortices, when close to the intense vortex of the same sign, tend to be drawn out into filaments due to their susceptibility to stretching by the flow. This behavior aligns with the observations and findings discussed in [7, 33-35].

Thus, when $|\gamma / e| \le 1$, a stretching mode is allowed, but only a stretching mode exists in the zone colored in purple in Fig. 2. Indeed, when the conditions align such that σ and γ have certain relationships, primarily when they differ in sign, a stretching mode becomes allowed. In the purple-shaded zone on Fig. 2, only this stretching mode is observed, indicating that vortices in this region predominantly exhibit the behavior of stretching their cores.

The availability of real-world information about the current field in various regions of the World Ocean allows for the empirical determination of which regime (rotation, oscillation, stretching, or a combination thereof) is realized in specific areas. These empirical findings can provide valuable insights into the behavior of vortices in different oceanic regions. Despite the fact that the presented theory relates to the parameter K = 0.2, these results can be extended to other parameters of the vertical flatness of the vortex if the dimension theory is applied. More details are provided in the Appendix II.

The results of this empirical analysis, which identify the dominant vortex behavior in various parts of the World Ocean, are expected to be presented in one of the upcoming sections. These findings will contribute to a better understanding of mesoscale oceanic phenomena and their impact on ocean circulation and dynamics.

4. Data and Methods

To achieve the objectives of the study, we rely on satellite altimetry data, which are compiled by merging measurements from various altimetry missions, including Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, TOPEX/Poseidon, Envisat, GFO, ERS1/2. We utilized Sea Level Anomalies (SLA) and geostrophic velocity components derived from dynamic topography data (ADT). These datasets were obtained from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) portal (http://marine.copernicus.eu/). The data is a comprehensive compilation of measurements from various altimetry missions, including missions such as Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, TOPEX/Poseidon, Envisat, GFO, and ERS1/2, spanning from 1993 to the present.

This SLA data is a result of an interpolated dataset CMEMS with a spatial resolution of 0.25 degrees for both latitude and longitude. The data is provided at a temporal interval of 1 day, as outlined in [36]. The most recent update of the dataset incorporates several improvements. These include the addition of a new sensor and atmospheric corrections, recalibration of various altimeters, the integration of a new tide model, and an extension of the base period for estimating mean sea level to 20 years, as documented in [37].

For this dataset, Sea Level Anomalies (SLAs) were computed relative to the Mean Sea Surface (MSS) data, which is accessible through the Aviso+ portal (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data, http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mss.html). The altimetry data covers the period from 1993 to 2021. These enhancements and the utilization of the updated MSS data contribute to the accuracy and comprehensiveness of the dataset, making it valuable for various applications related to oceanography and sea level analysis over this 28-year period.

In this work, we also use the data of the regional hydrodynamic model of the MITgcm (Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model) with a horizontal spatial resolution of about 4 km and 50 layers from 10 m in thickness near the surface to 456 m near the bottom. A description of the model can be found in [38]. Oceanic boundary conditions were taken from the optimal implementation of the global ECCO2 model, and the initial conditions were taken from the World Ocean Atlas 2009 database. As forcing, the model uses atmospheric reanalysis data JRA55 (Japanese 55-year Re-analysis).

In the context of studying the impact of background flow on vortices, an essential parameter is the dimensionless number $|\gamma/e|$, which characterizes the properties of background flow inhomogeneities. However, when attempting to calculate $|\gamma/e|$ using altimetry data, where currents and vortices are intertwined, it becomes necessary to distinguish between the properties of currents and vortices. In this research paper, we employ a relatively straightforward approach to address this issue. In the first step, we extract the values of the desired characteristics from the 0.25° altimetric data grid and place them onto a coarser 1° grid. This process results in the majority of vortices being filtered out, as they fall into the coarser subgrid area. Nonetheless, some vortices still intersect with the nodes of the 1° grid, introducing a degree of error into the analyzed flow. However, the averaging process smooths out the spatial inhomogeneities in the flow itself, making the real properties of the flows align more closely with the theoretical requirements of large-scale flows. While it's important to acknowledge that complete separation of flow fields from vortex fields is not achievable through this method, it does significantly reduce the influence of vortices on the parameters γ and *e*. Consequently, it also diminishes the significance of vortex effects on the final parameter $|\gamma/e|$ characterizing the background flow.

5. Results

Mesoscale vortices are one of the most common dynamic structures of the World Ocean, covering about 1/3 of its area [1, 39]. In this section, we do not analyze the features of vortex formation in a particular region of the World Ocean and its regional specifics considering various regions just as examples. We also do not analyze the spatial and temporal variability caused by mesoscale vortices. We are interested in a property of vortices in the ocean that has not been studied before, namely, the ability of vortices to stretch into filaments. We demonstrate this property for one randomly selected date July 1, 2022. We believe that choosing a different date will not significantly change the estimates obtained. We consider the property of vortices to elongation for the World Ocean and for individual regions, the choice of which in this study also does not matter significantly.

We proceed to calculate the proportion of mesoscale eddies that undergo unlimited elongation into submesoscale filaments under the influence of a barotropic current in different regions of the World Ocean. For this analysis, we shift to a geographical coordinate system where the x-axis is oriented to the east, and the y-axis is oriented to the north. In Figure 3, we observe a patchy distribution across the World Ocean, with regions exhibiting properties $|\gamma/e| > 1$ (indicating that vortex stretching into filaments is not allowed) and properties $|\gamma/e| < 1$ (representing the regime of unrestricted vortex stretching).

This analysis seeks to quantify the prevalence of mesoscale eddies transitioning into submesoscale filaments in various oceanic areas, shedding light on the geographical distribution of this phenomenon and its implications for ocean dynamics.

Estimates of domain scales at latitudes around 30° North and South indicate that the characteristic size of the "spots" is approximately 200 kilometers. Meanwhile, the size of the larger "spots" with a brown color $\left(\frac{|\gamma|}{e} > 1\right)$ is less

than the size of large "spots" of blue $\left(\frac{|\gamma|}{|e|} < 1\right)$. It means that $S_{\leq 1}$ — the integral areas of the regions corresponding to

the regime of unrestricted elongation of mesoscale vortices into filaments are greater than the areas of regions where



Fig. 3. The geographical distribution of the parameter $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$ in the World Ocean was obtained from altimetry data using spatial averaging via the moving average method with a window width of 1°. This data is dated July 1, 2022, and it provides insights into how this parameter varies across different oceanic regions. In this representation, a brown color is used to denote spots with a certain characteristic $|\gamma/e| > 1$, indicating that vortex stretching into filaments is prohibited. On the other hand, a blue color is employed for spots with a different characteristic $|\gamma/e| < 1$, signifying that the regime of unlimited vortex stretching is taking place in those regions. These color distinctions help visualize the distribution of vortex behavior in the World Ocean based on the specified criteria

elongation is prohibited. Indeed, our estimates demonstrate a specific ratio $S_{\leq 1}$ to the total surface area *S* of the World Ocean $\frac{S_{\leq 1}}{S} = 0.60$. When we calculate the same ratio using altimeter data with a spatial resolution of 0.25 degrees, we obtain $\frac{S_{\leq 1}}{S} = 0.66$. The ratio of the integral areas represented by the blue color $S_{\leq 1}$ and the areas of brown color $S_{>1}$

on a one-degree grid without averaging is $\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}} \approx 1.9$, and it is $\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}} \approx 1.5$ with spatial averaging. From the analysis, it

can be deduced that the integral area of the World Ocean domains where eddies can elongate is larger than the integral area of domains where elongation is prohibited. The estimated ratio of areas, both with and without field averaging, is expressed as follows:

$$1.5 < \frac{S_{\le 1}}{S_{>1}} < 1.9 , \tag{3}$$

$$0.60 < \frac{S_{\le 1}}{S} < 0.66 .$$
 (4)

It's important to note that the maps (Fig. 3–5) are considered for a single date each and that the spatial smoothing is applied individually for each date. To assess the seasonal variations and interannual variability in the spatial distribution of the parameter $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$, we conducted analyses using appropriate time-averaging techniques for the period spanning from 1993 to 2021. The results of these averaged calculations are presented in Tables 1 and 2, allowing us to gain insights into the parameter's behavior over this extended time frame.

Hence, the ratio of integral areas across various types of domains displays minimal variation from one season to another. This consistency is maintained even during interannual fluctuations, as evidenced by the data presented in Table 2.

Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П.

Table 1

The seasonal	l variations in	the ratios o	of integral areas	corresponding	to different t	ypes of domains

	World Ocean		Northwe	st Pacific	Arabian Sea and the Bay of Bengal		
Season	$S_{\leq 1} / S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$	$S_{\leq 1} / S_{>1}$	$S_{\leq 1} / S$	$S_{\leq 1} / S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$	
Winter	1.49	0.60	1.73	0.63	1.18	0.54	
Spring	1.49	0.60	1.68	0.63	1.43	0.59	
Summer	1.48	0.60	1.65	0.62	1.77	0.64	
Autumn	1.44	0.59	1.64	0.62	1.52	0.60	

Table 2

The interannual variability in the ratios of integral areas corresponding to different types of doma	ains
--	------

	World Ocean		Northwest Pacific Ocean		Arabian Sea and the Bay of Bengal	
Year	$S_{\leq 1} / S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$	$S_{\leq 1} / S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$	$S_{\leq 1} / S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$
1993	1.51	0.60	1.91	0.66	1.49	0.60
1994	1.49	0.60	1.92	0.66	1.52	0.60
1995	1.52	0.60	1.83	0.65	1.43	0.59
1996	1.48	0.60	1.75	0.64	1.43	0.59
1997	1.50	0.60	1.86	0.65	1.35	0.58
1998	1.54	0.61	1.97	0.66	1.39	0.58
1999	1.47	0.60	1.86	0.65	1.30	0.57
2000	1.48	0.60	1.99	0.67	1.47	0.60
2001	1.48	0.60	2.09	0.68	1.58	0.61
2002	1.49	0.60	1.83	0.65	1.45	0.59
2003	1.49	0.60	1.99	0.67	1.48	0.60
2004	1.49	0.60	1.85	0.65	1.34	0.57
2005	1.51	0.60	2.11	0.68	1.44	0.59
2006	1.49	0.60	1.96	0.66	1.31	0.57
2007	1.51	0.60	1.78	0.64	1.74	0.64
2008	1.50	0.60	1.73	0.63	1.27	0.56
2009	1.49	0.60	1.69	0.63	1.36	0.58
2010	1.48	0.60	1.62	0.62	1.63	0.62
2011	1.51	0.60	1.69	0.63	1.66	0.62
2012	1.50	0.60	1.71	0.63	1.57	0.61
2013	1.51	0.60	1.95	0.66	1.42	0.59
2014	1.48	0.60	2.08	0.68	1.49	0.60
2015	1.49	0.60	2.08	0.68	1.30	0.56
2016	1.50	0.60	1.65	0.62	1.46	0.59
2017	1.56	0.61	1.98	0.66	1.60	0.62
2018	1.50	0.60	1.66	0.62	1.40	0.58
2019	1.50	0.60	1.93	0.66	1.39	0.58
2020	1.49	0.60	1.90	0.65	1.43	0.59
2021	1.50	0.60	1.99	0.67	1.50	0.60
The averages calculated for the period spanning from 1993 to 2021.	1.50	0.60	1.69	0.63	1.40	0.58

Figures 4–6 depict the spatial distributions of domains with distinct characteristics within specific regions of the World Ocean. These figures provide visual insights into how these properties vary across various oceanic areas. Table 1 depicts the seasonal variability of $S_{\leq 1}$ and $S_{\leq 1}$ distributions for the World Ocean, Northwest Pacific, Arabi-

an Sea, and the Bay of Bengal individually. Table 2 demonstrates the interannual variability of $\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}}$ and $\frac{S_{\leq 1}}{S}$

distributions for these basins. They reveal the insignificant seasonal and interannual variability inside every basin because there are small differences in values of these characteristics. However, there are differences for the various areas which is understandable since the intensity of the vortex dynamics varies for different areas. Figures 4 and 5 demonstrate these distributions for the chosen date (July 1, 2022) as well as for the different seasons which correspond to the values in Table 1.



These color distinctions help visualize the distribution of vortex behavior within the Northwest Pacific Ocean based on the specified criteria





Fig. 5. The geographical distribution of the parameter $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$ for the Arabian Sea and the Bay of Bengal of the Indian Ocean was derived from altimetry data using spatial averaging via the moving average method with a window width of 1°. The top figure presents the distribution for July 1, 2022, and the lower figures demonstrate the seasonal variability for 1993–2021. A brown color is indicative of spots with a specific characteristic $|\gamma/e| > 1$, denoting that vortex stretching into filaments is prohibited. Conversely, the blue color is used to designate spots with a different characteristic $|\gamma/e| < 1$, signifying that the regime of unlimited vortex stretching is occurring in those regions

It's noteworthy that the ratio of integral domain areas $S_{\leq 1}$ (representing vortex stretching and other properties) to the total area of the ocean (S) has exhibited remarkable stability, consistently remaining at 60 %. This finding implies that mesoscale eddies in the ocean have the capacity to stretch, but the overall integral areas where this property is observed remain relatively constant.

Therefore, we observe another conservation principle at play, which we refer to as the "law of conservation of the integral area of the World Ocean," where the ratio of integral domain areas to the total ocean area remains approximately constant at 60 %. This signifies that regions in the World Ocean where mesoscale eddies can elongate into vortex filaments maintain their overall integral area over time. Similarly, the integral area of regions where stretching is prohibited remains conserved. Typically, these regions correspond to areas where quasi-stationary eddies are located, such as the Lofoten Basin eddy (as discussed in [30, 40], or in areas where large rings are formed, such as the Agulhas Current region (as observed in [41, 42]). This conservation phenomenon suggests that these regions with specific eddy characteristics maintain their integral areas consistently over time.

6. Discussion and Conclusion

Within mesoscale vortices, the field of relative vorticity tends to remain relatively uniform because the development of filaments within the cores of these vortices is limited. While filaments can form outside the vortices, they tend to dissipate quickly due to diffusion. As a result, dynamically active regions like the Agulhas, Gulf Stream, and Kuroshio may contain areas with both filamentary structures and smoother features.

The question arises: do the regions $|\gamma/e| > 1$ really identify the property of ocean dynamics, where there is a prohibition of vortices to elongation? For this purpose, we compare the various characteristics characterizing the presence of a vortex in a given area with standard parameters that are commonly used in vortex analysis. We are talking about relative vorticity and the Okubo-Weiss parameter. The object of comparison is a quasi-permanent anticyclonic Lofoten vortex. A notable feature of the Lofoten anticyclone is that it has a topographic nature and is quasi-permanent. This means that the vortex is constantly in approximately the same place.

The Lofoten Vortex is of great interest to researchers, being a unique natural laboratory for studying vortices in nature. It is represented by a lens of warm salt water at a depth interval of 300-1000 m with a horizontal scale of about 60-80 km. According to glider data, the radius of the vortex core is 18 ± 4 km [43]. The existence of a quasi-constant anticyclonic Lofoten Vortex in the basin is confirmed by in situ measurements [11, 43–49], satellite data [30, 33, 50-52], and hydrodynamic modeling data [33, 38, 48, 53-58]. Its most probable location in the Lofoten Basin is limited to $69^{\circ}-70^{\circ}$ N and $2^{\circ}-5^{\circ}$ E. The Lofoten Vortex is in continuous motion mainly along isobaths in a cyclonic direction at a speed of 3-4 cm/s relative to the center of the basin. The maximum orbital velocities in the vortex are 50-70 cm/s.

Let's focus on the stretching impact of the flow near the Lofoten anticyclone. In this context, "flow" encompasses es the combined influence of the background flow and the flow generated by the Lofoten vortex itself. This combination of flows leads to the creation of elongated vortices in the vicinity of the Lofoten anticyclone. Figure 6a displays the relative vorticity field in the mid-flow. In the depicted figure, the vortex core is characterized by a negative vorticity on the order of $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, represented by the blue color. In the vicinity of the vortex, there are regions with positive vorticity of a similar order, indicated by the brown color. The Rossby number in this area does not exceed 0.25 (with the Coriolis parameter $f = 1.371 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ at 70° N). Furthermore, the analysis includes the calculation of the strain rate or deformed flow field, following the Okubo-Weiss formulation (as described in [59, 60]). This additional analysis provides insights into the deformation characteristics of the flow field within this region (Fig. 6b):

$$W = s_n^2 + s_s^2 - \zeta^2, \text{ where } \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{f} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \text{ is the relative vorticity, } s_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ and } s_s = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} +$$

 $=\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{f} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right)$ are both normal (*s_n*) and shear (*s_s*) components, and *h* is the SLA. It's observed that in

regions where relative vorticity predominates, the Okubo-Weiss parameter tends to be negative (W < 0). Conversely, in areas where vortex movements within the currents are less pronounced, the Okubo-Weiss parameter tends to be positive (W > 0). The Okubo-Weiss parameter is a valuable tool for identifying regions where the shear and normal components of flow exceed the relative vorticity values. When this parameter is negative, it indicates that particle rotation dominates in the fluid. Conversely, when it is positive, it suggests that shear and normal stress components are dominant. Importantly, the Okubo-Weiss parameter can be negative for both cyclones and anticyclones, signifying its utility in characterizing a range of oceanic phenomena.

It's important to emphasize that Figures 6c and 6d illustrate the absence of stretching in the area where the core of the Lofoten anticyclone is located. High vortex activity is observed in the Lofoten basin, while a wide variety of vortex core shapes is observed — from almost round to strongly elongated horizontally or writhing filaments [33, 34, 40, 42, 7, 50, 61]. The main feature of the Lofoten basin is the quasi-permanent anticyclonic Lofoten vortex, which is depicted as a localized formation with limited deformations. Based on this observation, we assume that submesoscale vortices located in the brown-shaded zones should exhibit similar behavior. Therefore, we conclude that unlimited stretching of small vortices is permitted in the vicinity of the core, within a region approximately equivalent to the diameter of the vortex's core. In this region, vortices have the potential to transform into filaments.

When we compare Fig. 6, *a* and 6b with 6c and 6d, a clear pattern emerges. The brown regions in Fig. 6c and 6d predominantly align with the areas occupied by large-scale vortex structures. In Fig. 6a, we can observe two distinct vortices, one being an anticyclone and the other a cyclone. The center of the anticyclone, which is shown in blue in Fig. 6a (negative relative vorticity) has coordinates 69.7° N, 3° E, and the center of the cyclone, which is shown in red in Figure 6a (positive relative vorticity) has coordinates 70.3° N, 4.8° E. It is noteworthy that the cyclone and anticy-

Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П.



Fig. 6. The spatial distribution of various characteristics in the Lofoten Basin area on June 10, 2010, is depicted as follows: a — the relative vorticity; b — the Okubo-Weiss parameter; c — the parameter $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$ according to altimetry; d — the parameter $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$ according to MIT data. Brown color in c) and d) indicates areas, where stretching of vortices is prohibited, while blue color corresponds to zones where vortices can be stretched

clone regions show the areas in Figure 6c where stretching is vortex-prohibited. Remarkably, these vortices are also prominently indicated in the Okubo-Weiss parameter field (Fig. 6b). The differences in the location of the regions in Figures 6a and 6b are also understandable since the relative vorticity and the Okubo-Weiss parameter are calculated using different formulas based on data with a spatial resolution of 0.25° . Additionally, let's take into account the important fact that second-order differential derivatives are calculated to construct the distributions for ζ and W.

The differences in Fig. 6c and 6d are determined by the fact that they are based on different datasets. Fig. 6c is based on altimetric data with a spatial resolution of 0.25°, and Fig. 6d is based on data from a high-resolution hydrodynamic model MIT with a spatial resolution of 4 km. It would be very naive to expect a 100 % coincidence of the patterns in the figures constructed using different datasets. On the whole, Fig. 6 reinforces the notion that these largescale vortices are unable to undergo stretching, as implied by brown-shaded areas in the parameter map (Fig. 6c and 6d). In other words, these stable vortexes are located in the areas where it is a prohibited vortex stretching.

In addition, there are natural limitations due to the framework of the basic theory. Recall that the theory describes barotropic flows with baroclinic vortices, which we approximate by ellipsoids. Of course, this is to a certain extent a first approximation. In the real ocean, things are much more complicated.

A fascinating new characteristic of the World Ocean's eddies has been uncovered. It appears that, under the influence of the deforming effects of large-scale currents, certain mesoscale eddies are undergoing stretching, transforming into filaments. This investigation was conducted using GLORYS12V1 reanalysis data at a spatial resolution of $1/12^\circ$, as documented in [5, 6, 31, 32]. However, it has been discovered that this property also applies to altimetric data with a spatial resolution of 0.25° , showcasing the universality of this phenomenon across different datasets and resolutions.

As previously established, there is a notable and consistent preservation of the ratio (approximately 60 %) between the total areas where the stretching of vortices into filaments is allowed and the areas where such stretching is prohibited within the ocean. It is noteworthy that the integrated area of regions where vortices can stretch into filaments predominates over other areas. This ratio remains consistent not only for the entire World Ocean but also for specific oceanic regions, highlighting its universality across different scales of observation.

As vortices undergo stretching, the initial energy concentrated within their characteristic horizontal dimensions is redistributed to smaller scales, roughly aligning with the horizontal width of the resulting filaments. This mechanism represents one of the possible pathways for energy transfer from mesoscale formations to submesoscale motions. This process can be seen as an example of how a portion of energy transitions from the mesoscale to the submesoscale. This mechanism may be considered as the primary method of energy transfer between these scales, illustrating how energy is effectively transferred from larger eddies to smaller-scale features in the ocean.

If we consider a collection of mesoscale eddies in the presence of a large-scale background flow as a geophysical quasi-two-dimensional turbulence, such a system can also undergo a reverse energy redistribution process. In this process, energy transfers from smaller scales to larger ones due to the merging of eddies. However, it's essential to note that merging occurs primarily when vortices are closely spaced. In the context of two-dimensional fluid dynamics, the critical distance between the nearest boundary points of flat vortices is approximately 0.6 times the initial vortex scale, as described in [62]. Nevertheless, it's important to recognize that two-dimensional hydrodynamics offers only a simplified representation of the actual behavior of ocean eddies, and the real dynamics can be more complex and three-dimensional. In the context of three-dimensional hydrodynamics in the ocean, especially for thin eddies (which make up the majority of baroclinic eddies in the ocean), the estimated critical distance for merging is relatively small. In such cases, the merging process requires vortices to come very close to each other, almost making physical contact, as detailed in [18]. This indicates that the dynamics of eddy merging in the ocean can be quite intricate and may differ significantly from the simplified scenarios presented in two-dimensional fluid dynamics.

The process of vortices merging occurs quite rapidly. Therefore, within a collection of eddies, it's expected that closely positioned individual eddies will merge early in their development. Over time, the remaining localized vortices will interact with each other in a manner that resembles their behavior as point vortices. This interaction with the background flow primarily affects the vortices and can result in a significant portion of them stretching into filaments.

During the initial phase of the evolution of an ensemble of vortices in the presence of a deforming flow, it's reasonable to anticipate energy transfer from vortices to filaments. However, the specific mechanisms of vortex energy transfer across the spectrum of scales remain somewhat unclear. Nevertheless, based on the authors' observations, the process of vortices transforming into filaments seems to dominate over the process of vortices merging. This ultimately leads to a comprehensive redistribution of vortex energy from the mesoscale to the submesoscale in the oceanic dynamics.

The assessment of vortex energy has revealed an interesting pattern: as a vortex extends in length, its energy levels, including kinetic energy, available potential energy, and the combined energy of both types, decrease concurrently with the stretching of the vortex core. Theoretical calculations have indicated a substantial decrease in vortex energy when the core undergoes significant elongation, ranging from 20 % to 60 %. These same investigations were applied to the study of real eddies in the Lofoten Basin (as detailed in [24]), where both qualitative and quantitative alignment with theoretical findings was demonstrated.

This raises a natural question: where does the energy lost during the elongation of the vortex go?

Considering that our physical system consists solely of a vortex and a flow, it's reasonable to expect that the vortex's energy will be redistributed to the flow. In the context of an ensemble of eddies as a form of geophysical turbulence, where eddies arise from a flow and subsequently engage in energetic interactions with it, the phenomenon of energy being returned from turbulence to the flow is known as negative viscosity. This phenomenon is highly intriguing and not yet fully understood. Interest in negative viscosity has grown since Victor Starr's publication [29].

In the context of the research, it can be asserted that you have encountered the phenomenon of negative viscosity, and you are even able to identify areas on the map of the World Ocean where this negative viscosity is expected to manifest itself. This suggests that the study contributes to a deeper understanding of the complex dynamics of energy transfer and redistribution within the oceanic system. These areas can be characterized as domains with the property $\left|\frac{\gamma}{e}\right| \le 1$. All these zones are depicted in blue color in Fig. 3–5, where the combined area of the identified negative viscosity zones is extensive, encompassing approximately 60–66 % of the total area of the World Ocean. However, it should be noted that many physical processes unresolved by $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$ maps also can contribute to the sign of viscosity (e. g. instability of the mixed layer, frontal instability, vortex instability, vortex interactions, etc.).

In our work, we neglected the interaction of vortices with vortices, leaving only the interaction of vortices with background currents. Let's try to understand at a qualitative level what new things should turn out if we take into account this interaction. The following happens in the ensemble of interacting vortices. Closely spaced vortices of the same name will merge, and weak vortices will stretch out into filaments. Larger vortex centers surrounded by vortex filaments will appear in the considered ensemble. According to our theory, the size of vortices does not play any role in the ability of vortices to stretch in background flows. Only the potential vorticity of the liquid in the core is important. The background flow, acting on such an altered vortex field, will also pull part of the large vortex centers into filaments. As a result, there will be more vortex filaments than in the case of a simple effect of flows on vortices. The purpose of our work is to show that the conditions for the formation of filaments from vortices are formed in the ocean. Taking into account the interaction of vortices with each other, these conditions will only intensify.

APPENDIX I

In the barotropic ocean, the term potential vorticity is used in the law of conservation of magnitude $\frac{f + rot_z \vec{u}}{H}$, where *H* is the thickness of a homogeneous liquid layer. For a barotropic background flow $rot_z \vec{u} = 2\gamma$. Here you really need to consider $(f + 2\gamma)$. However, in our problem we consider a baroclinic ocean and baroclinic vortices, but with a barotropic background flow. The potential vorticity in our case is different: $\sigma = rot_z \vec{u} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ (ψ is the current function) and does not match with $\frac{f + rot_z \vec{u}}{H}$ neither in physics nor in dimension. Therefore, it is not necessary to add *f* and $rot_z \vec{u}$ in this study.

APPENDIX II

To analyze the behavior of vortices in the flow (1), we apply the theory of dimension. In the background flow $\vec{u} = (u, v, 0)$, the coefficients *e* and γ have the same dimension m^{-1} . An ellipsoidal vortex, in addition to three geometric dimensions — the lengths of the semi–axes, has another dimensional parameter σ which means excess of the potential vorticity of the core over the potential vorticity of the background flow. The potential vorticity of the barotrop-

ic background flow σ coincides with the relative vorticity $\gamma = \frac{1}{2} rot_z \vec{u}_b(x, y)$. The dimensions of σ and the relative vorticity of the background flow also coincide.

Let's return to the geometric parameters of the vortex core. Let us denote the sizes of the horizontal semi-axes of the vortex core as *a* and *b*, and the size of the vertical half-axis is *c*. Note that the problem of the evolution of an ellipsoidal core is studied at a constant the Väisälä-Brunt frequency *N* [25–28, 18, and references herein). The problem of vortex evolution is formulated in a mathematical space where the vertical *z*-axis is stretched (*N*)/*f* times (*f* is the Coriolis parameter). As a result, in such a vertically stretched space, the horizontal half-axes *a* and *b* of the ellipsoid remained the same, and the vertical half-axis stretched (*N*)/*f* times. Denote the stretched axis as $\tilde{c} = \frac{N}{f}c$. In barotropic flows (2), the vertical semi-axis \tilde{c} does not change, and the horizontal semi-axis change so that their product $a(t) \times b(t)$ is also preserved. In this formulation, the vortex core has three dimensional geometric parameters *a*, *b* and \tilde{c} , from which two dimensionless geometric parameters of the vortex can be made, and they are the parameter of horizontal elongation $\varepsilon = a/b$ and the parameter of vertical oblateness of the core $K = \frac{\tilde{c}}{\sqrt{a b}}$. The parameter *K* for

each vortex does not change, while ε changes with time. From a set of other dimensional parameters of the problem

e, γ and σ , it is also possible to compose two dimensionless parameters $(\gamma)/e$ and $(\sigma)/e$, which do not change over time for each vortex in its flow. There is another dimensionless parameter in the problem, i. e. the orientation angle of the vortex θ or the angle of rotation for the certainty of the semi-axis of the ellipsoid *a* with respect to the *x*-axis of a convenient coordinate system. In this formulation, it is possible to reduce the problem of the behavior of a vortex in a barotropic flow to the problem of the evolution of two variables over time of the vortex parameters ε and θ depending on the remaining dimensionless parameters (σ)/*e*, (γ)/*e* and *K*. In the complete mathematical formulation of the problem, we should add the initial conditions for ε and θ , denote them ε_0 and θ_0 .

As a result, the problem of vortex behavior in the flow (2) can be considered on the plane of dimensionless parameters $((\sigma)/e, (\gamma)/e)$ for a set of fixed values of *K*. Let's choose the most characteristic value of the flatness parameter K = 0.2. Of course, other values of *K* may also occur, so additionally consider K = 0.1 and K = 0.3. When the parameter *K* is changed, the boundaries separating zones with different behavior of vortices in the band $|(\gamma)/e| < 1$ change. Decreasing the parameter *K* will expand the boundaries of the purple zone in Figure 2. Options for changing the boundaries of zones of different vortex behavior at different values of *K* are shown in Figure A1. The coefficient of boundary expansion (or the coefficient of boundaries between the yellow and purple zones. Thus, the boundaries in Figure 2 are self-similar, i. e. they are obtained from each other by stretching or compressing the scale of the horizontal axis (σ)/*e*. From K = 0.2, we can obtain these boundaries for other values of *K*.



Fig. A1. The nature of the change in the boundaries of zones of different behavior of vortices at different values K = 0.1, 0.2, 0.3 in the plane of dimensionless characteristics $((\sigma)/e, (\gamma)/e)$



Fig. A2. The scaling factor L of the boundaries of the regions of different behavior of vortices

APPENDIX III

The famous scientist Kirchhoff [63] mathematically formulated and solved the problem of the behavior of a vortex in the form of an elliptical equal-vortex region in a medium at rest at infinity for the case of an ideal fluid. Such a vortex is called a Kirchhoff vortex and is an exact solution of the Euler equations for the case of plane hydrodynamics of an ideal fluid. According to Kirchhoff, the behavior of an elliptical equal-vortex region was reduced to the rotation of the ellipse (rotation of the shape of the vortex core) with a constant angular velocity without changing the lengths of the ellipse axes. The fluid particles inside the elliptical vortex core overtake the rotation of the shape. The center of the vortex stands still. All hydrophysical fields are continuous. In particular, the velocity field is continuous, but the derivatives of the tangential velocity normal to the vortex boundary break at the boundary itself, therefore the vorticity changes abruptly, which is included in the formulation of the problem. The speed inside the ellipse increases from the center to the boundary of the ellipse, and it decreases outside the ellipse with asymptotic behavior 1/R at large distances R. The next generation of researchers solved the problem of the evolution of the Kirchhoff vortex in background flows.

The next generation of researchers solved the problem of the evolution of the Kirchhoff vortex in background flows. The Japanese hydrodynamicist Kida [15], who described the behavior of the Kirchhoff vortex in equally vortex flows of plane hydrodynamics, coped with this problem most successfully. Equally swirling flows were not chosen by Kida by chance. Only in such flows will the vortex, being elliptical at the initial moment, remain elliptical further. But at the same time, the elliptical vortex core moves as a whole along the flow at the speed of the background flow at the center of the vortex. In this case, the core can rotate, and deform with rotating, remaining an ellipse. Kid's work gave rise to a huge number of theoretical, laboratory, and numerical studies on the evolution of Kirchhoff vortices in the flows.

Let's take a closer look at the background currents that Kida used. These are flat incompressible flows with velocities linearly dependent on coordinates

$$u = u_0 + e x - \gamma_1 y, v = v_0 + \gamma_2 x - e y.$$
(A1)

Здесь (x, y) — произвольная система ортогональных координаты; $u_0, v_0, e, \gamma_1, \gamma_2$ константы, привязанные к выбранной системе координат. При изменении системы координат, например, при повороте, все указанные константы u_0 , v_0 , e, γ_1 , γ_2 .

Here (x, y) is an arbitrary system of orthogonal coordinates; $u_0, v_0, e, \gamma_1, \gamma_2$, are the constants tied to the selected coordinate system. When changing the coordinate system, for example, when rotating, all specified constants u_0, v_0 , e, γ_1, γ_2 will change. However, a number of properties should be preserved. For example, the linear dependence (A1) on coordinates will be preserved in any coordinate system. Further, in any system, the coefficient e for x in the first equation and the coefficient *e* for *y* in the second equation must be identical in magnitude but have different signs. However, the coefficient e will change when changing the coordinate system. Finally, it follows from the equality

 $\gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ that the sum of the coefficients $g_1 + g_2$ is the same in any coordinate system. Further, by a parallel

shift, you can always select a coordinate system in which $u_0 = v_0 = 0$. In this coordinate system:

 $\tilde{\gamma}_1$

$$\begin{cases} u = ex - \gamma_1 y \\ v = \gamma_2 x - ey. \end{cases}$$
(A2)

Let's consider two coordinate systems: the old (x, y) and a new (\tilde{x}, \tilde{y}) . In the new coordinate system, the property of linearity will be preserved:

$$\begin{cases} \tilde{u} = \tilde{e}\tilde{x} - \tilde{\gamma}_1 \tilde{y} \\ \tilde{v} = \tilde{\gamma}_2 \tilde{x} - \tilde{e} \tilde{y}. \end{cases}$$
(A3)

Naturally, *e* and \tilde{e} differ from each other, but $\gamma_1 + \gamma_2 = 2\tilde{\gamma} = rot_z \vec{u}$. Let the new system be turned to the old one at an angle α . Then the coefficients e, γ_1, γ_2 and $\tilde{e}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_2$ are related by the relations

$$\tilde{e}_1 = e_1 \cos 2\alpha - \frac{1}{2} (\gamma_1 - \gamma_2) \sin 2\alpha ,$$

$$= e_1 \sin 2\alpha + \frac{1}{2} (\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{1}{2} (\gamma_1 - \gamma_2) \cos 2\alpha ,$$
 (A4)

$$\tilde{\gamma}_2 = -e_1 \sin 2\alpha + \frac{1}{2} (\gamma_1 + \gamma_2) - \frac{1}{2} (\gamma_1 - \gamma_2) \cos 2\alpha$$

Statement: you can always choose such a coordinate system (find the angle of rotation α), wherein $\tilde{\gamma}_1 = \tilde{\gamma}_2 = \tilde{\gamma}$. In this case

$$e_{1}\sin 2\alpha + \frac{1}{2}(\gamma_{1} + \gamma_{2}) + \frac{1}{2}(\gamma_{1} - \gamma_{2})\cos 2\alpha = -e_{1}\sin 2\alpha + \frac{1}{2}(\gamma_{1} + \gamma_{2}) - \frac{1}{2}(\gamma_{1} - \gamma_{2})\cos 2\alpha,$$
$$e_{1}\sin 2\alpha + \frac{1}{2}(\gamma_{1} - \gamma_{2})\cos 2\alpha = 0,$$
$$tg2\alpha = -\frac{\gamma_{1} - \gamma_{2}}{2e_{1}}.$$

In the new coordinate system

$$\begin{split} \tilde{\gamma}_1 &= \tilde{\gamma}_2 = \tilde{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\gamma_1 + \gamma_2 \right), \\ \tilde{e}_1 &= \sqrt{{e_1}^2 + \frac{1}{4} \left(\gamma_1 - \gamma_2 \right)^2}. \end{split}$$

For uniformity, we denote $\tilde{e} = \tilde{e}_1$. Thus, with a linear dependence of the speed of flat currents on coordinates, it is always possible to select a coordinate system in which the speed field looks like this:

$$u = \tilde{e}x - \tilde{\gamma}y$$
$$v = \tilde{\gamma}x - \tilde{e}y$$

Now let us explain why, following Kida, we consider such a coordinate system convenient. The point is this. If we worked with the old coordinate system, in which the velocity field would be given by relations (A2), then the equations for the evolution of the parameters of an elliptical vortex look as follows

$$\dot{a} = -b\left[e\cos 2\theta - \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)\sin 2\theta\right],$$
$$\dot{b} = a\left[e\cos 2\theta - \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)\sin 2\theta\right],$$
$$\dot{\theta} = \Omega(a,b) + \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) - \frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2}\left[e\sin 2\theta + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)\cos 2\theta\right].$$

Here *a* and *b* are the values of the horizontal semi-axes of the ellipse and θ is the orientation angle of the vortex core in this coordinate system (the angle between axis *a* and the positive direction of axis *x*). $\Omega(a, b)$ is the own angular velocity of rotation of the ellipse in the absence of external flow:

$$\Omega(a,b) = \sigma \frac{\varepsilon}{(\varepsilon+1)^2}, \qquad \varepsilon = \frac{a}{b}$$

Here σ is the excess of the vortex core vorticity over the vorticity of the external flow. Note that the deformation of the semi-axes of the ellipse *a* and *b* in this coordinate system depends on all parameters of the external flow *e*, γ_1 , γ_2 .

If we move to a convenient coordinate system proposed by Kida, then the same velocity field in it is presented as

$$\begin{aligned} \widetilde{u} &= \widetilde{e}\widetilde{x} - \widetilde{\gamma}\widetilde{y} \\ \widetilde{v} &= \widetilde{\gamma}\widetilde{x} - \widetilde{e}\widetilde{y} \end{aligned}$$

and the evolution equations for the same vortex for a, b, and orientation angle θ look much simpler:

$$\dot{a} = -b\tilde{e}\,\cos 2\tilde{\theta}\,,$$
$$\dot{b} = a\tilde{e}\,\cos 2\tilde{\theta}\,,$$
$$= \Omega(a,b) + \tilde{\gamma} - \frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2}\tilde{e}\,\sin 2\tilde{\theta}$$

Here $\tilde{\theta}$ is the angle of orientation of the vortex in the new coordinate system.

ė

When described in a convenient Kida's coordinate system, only one parameter \tilde{e} of the external flow is responsible for the vortex deformation, calculated in the above convenient coordinate system. That is why \tilde{e} is called the deformation coefficient. In the general case, the coordinate system, which is convenient for studying the behavior of elliptical vortices in external flows, differs from the standard coordinate system for geophysicists, where the *x*-axis is directed to the East. To understand how vortices behave in the flows, we need to know only two flow parameters from a convenient coordinate system: the deformation coefficient \tilde{e} and the vertical component of the background flow

vorticity $\tilde{\gamma} = \frac{1}{2} rot_z \vec{u}$, which generally does not depend on the choice of the coordinate system. Therefore, the only parameter we need from a convenient coordinate system is the deformation coefficient \tilde{e} .

An equally swirling horizontal flow, independent of the vertical coordinate, has its name in oceanology — barotropic flow. When studying three-dimensional ellipsoidal vortices in barotropic flows, a convenient coordinate system coincides with Kida's coordinate system, and the behavior of the vortex characteristics differs only in the form of the function $\Omega(a, b)$, which in the case of ellipsoidal vortices will be more complex and will additionally depend on the size of the vertical semi-axis *c*.

Let's return to the flow field in the convenient Kida's coordinate system:

$$\begin{split} & \tilde{u} = \tilde{e}\tilde{x} - \tilde{\gamma}\tilde{y} \\ & \tilde{v} = \tilde{\gamma}\tilde{x} - \tilde{e}\tilde{y} \end{split} .$$

Further, we will work only in this coordinate system, so to simplify the recording we will discard the "tilde" sign on all letters

$$\begin{cases} u = ex - \gamma y \\ v = \gamma x - ey \end{cases}.$$

Moving on to the stream function $\psi(a, b)$, we get $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, and

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = ex - \gamma y$$
$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -\gamma x + ey$$

The solution to this system of equations

$$\psi(x,y) = -\frac{1}{2}\gamma(x^2 + y^2) + exy + C,$$

where *C* is the integration constant. Stream function isolines $\psi(x, y) = \text{const}$ in the stationary case coincide with the trajectories of particles. Therefore, the set of lines

$$-\frac{1}{2}\gamma\left(x^2+y^2\right)+exy=\text{const}$$

represents a set of trajectories of particles of equally swirling flows. Flows with different values e and γ describe completely the entire variety of equally swirling barotropic flows. The quadratic dependence of the trajectory equations indicates that the trajectories of motion can be hyperbolas and ellipses and, in the frequent case, plane-parallel flow with a constant velocity shift. An ellipsoidal vortex placed in an equally swirling barotropic flow will move as a whole with the speed of the background flow at its center. Simultaneously with the movement of the vortex as a whole, the

vortex is subjected to the deforming influence of the background flow, so vortices in the flows with $\left|\frac{\gamma}{e}\right| \le 1$ can stretch out. The inequality $|\gamma/e| > 1$ is a necessary condition for prohibiting the stretching of vortices. Everything that has been said is presented in detail, starting from [63] for two-dimensional hydrodynamics and also [5, 21, 22, 18].

Funding

Theoretical aspects of this research were developed under the auspices of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (State Assignment No. FMWE-2024-0016). Computational work was supported by St. Petersburg University (Grant No. 116442164). Figure generation and analysis of vortex evolution were supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 24-77-00063; https://rscf.ru/project/24-77-00063/).

References

- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanogra*phy. 2011;91:167–216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002
- Wood R.A. Mesoscale/Synoptic Coherent structures in Geophysical Turbulence. Editors: B.M. Jamart, J.C.J. Nihoul. 1989;50:265, 9780444874702
- Nencioli F., Dong C., Dickey T.D., Washburn L., McWilliams J.C. A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010;27(3):564–579. doi:10.1175/2009jtecho725.1
- Gurova E.S., Ivanov A. Yu. Appearance of Sea Surface Signatures and Current Features in the South-East Baltic Sea on the MODIS and SAR images. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2011;4:41–54 (In Russ.).
- Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Conditions for Transformation of a Mesoscale Vortex into a Submesoscale Vortex Filament When the Vortex Is Stretched by an Inhomogeneous Barotropic Flow. *Oceanology*. 2023;63(2):174–183. doi:10.1134/S0001437023020145
- Zhmur V.V., Belonenko T.V., Travkin V.S. et al. Changes in the Available Potential and Kinetic Energy of Mesoscale Vortices When They Are Stretched into Filaments. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11:1131. doi:10.3390/jmse11061131
- 7. Belonenko T.V., Zinchenko V.A., Fedorov A.M. et al. Interaction of the Lofoten Vortex with a satellite cyclone. *Pure and Applied Geophysics*. 2021;178:287–300. doi:10.1007/s00024-020-02647-1
- 8. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge at the University Press; 1970. 778 p.
- 9. McDowell S.E., Rossby H.T. Mediterranean Water: An Intense Mesoscale Eddy off the Bahamas. *Science*. 1978;202(4372): 1085–1087. doi:10.1126/science.202.4372.1085
- Carton X. Hydrodynamical Modeling Of Oceanic Vortices. Surveys in Geophysics. 2001;22:179–263. doi:10.1023/A:1013779219578
- 11. Fer I., Bosse A., Ferron B., Bouruet-Aubertot P. The dissipation of kinetic energy in the Lofoten Basin Eddy. *The Journal of Physical Oceanography*. 2018;48(6):1299–1316. doi:10.1175/JPO-D-17–0244.1
- 12. Zhmur V.V., Novoselova E.V., Belonenko T.V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 2. *Oceanology*. 2022;62(3):289–302. doi:10.1134/S0001437022030171
- 13. Chaplygin S.A. On a pulsating cylindrical vortex. *Trans. Phys. Sect. Imperial Moscow Soc. Friends of Natural Sciences*. 1899;10(1):13–22.
- 14. Chaplygin S.A. Collected Works, Vol. 2. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat; 1948:643 p. (in Russ.).
- 15. Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1981;50(10):3517–3520. doi:10.1143/JPSJ.50.3517
- 16. Polvani L.M., Flierl G.R. Generalized Kirchhoff vortices. Physics Fluids. 1986;29:2376-2379. doi:10.1063/1.865530
- 17. McKiver W.J., Dritschel G.G. Balanced solutions for an ellipsoidal vortex in a rotating stratified flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016;802:333–358. doi:10.1017/jfm.2016.462
- 18. Zhmur V.V. Mesoscale Ocean Eddies. Moscow: GEOS; 2011. 289 p. (in Russ.).
- Zhmur V.V., Novoselova E.V., Belonenko T.V. Peculiarities of formation of the density field in mesoscale eddies of the Lofoten Basin: Part 1. *Oceanology*. 2021;61(6):830–838. doi:10.1134/S0001437021060333
- Zhmur V.V., Novoselova E.V., Belonenko T.V. Potential Vorticity in the Ocean: Ertel and Rossby Approaches with Estimates for the Lofoten Vortex. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(6):632–641. doi:10.1134/ S0001433821050157
- Meacham S.P. Quasigeostrophical ellipsoidal vortices in stratified fluid. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 1992;16(3–4):189–223.
- Meacham S.P., Pankratov K.K., Shchepetkin A.F., Zhmur V.V. The interaction of ellipsoidal vortices with background shear flows in a stratified fluid. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 1994;21(2–3):167–212. doi:10.1016/0377-0265(94)90008-6
- Zhmur V.V., Harutyunyan D.A. Redistribution of Energy during Horizontal Stretching of Ocean Vortices by Barotropic Currents. *Oceanology*. 2023;63:1–16. doi: P10.1134/S0001437023010186
- Zhmur V.V., Travkin V.S., Belonenko T.V., Arutyunyan D.A. Transformation of Kinetic and Potential Energy during Elongation of a Mesoscale Vortex. *Physical Oceanography*. 2022;29(5):449–462. doi:10.22449/1573-160X-2022-5-449-462
- 25. McKiver W.J., Dritschel D.G. The motion of a fluid ellipsoid in a general linear background flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2003;474:147–173. doi:10.1017/S0022112002002859
- 26. McKiver W.J., Dritschel D.G. The stability of a quasi-geostrophic ellipsoidal vortex in a background shear flow. *Journal* of *Fluid Mechanics*. 2006;560:1–17. doi:10.1017/S0022112006000462

- 27. Dritschel D.G., Reinaud J.N., McKiver W.J. The quasi-geostrophic ellipsoidal vortex model. *Journal of Fluid Mechanics.* 2004;505:201–223. doi:10.1017/s0022112004008377
- Reinaud J.N., Dritschel D.G. The merger of vertically offset quasi-geostrophic vortices, *Journal of Fluid Mechanics*. 2002;469:287–315. doi:10.1017/s0022112002001854
- 29. Starr V.P. Physics of Negative Viscosity Phenomena. McGraw-Hill. 1968; 256 p.
- 30. Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin a sub-Arctic hot spot of ocean variability. *Geophysical Research Letters*. 2013; 40(4):738–743. doi:10.1002/grl.50126
- Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Direct and Inverse Energy Cascades in the Ocean during Vortex Elongation. *Doklady Earth Sciences*. 2023;508(2): 233–236. doi:10.1134/S1028334X22601675
- Zhmur V.V., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Suetin B.P. Application to the World Ocean of the Theory of Transformation of a Mesoscale Vortex into a Submesoscale Vortex Filament When the Vortex Is Elongated by an Inhomogeneous Barotropic Flow. *Oceanology*. 2023;63(2):184–194. doi:10.1134/S0001437023020157
- 33. Zinchenko V.A., Gordeeva S.M., Sobko Yu.V., Belonenko T.V. Analysis of Mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019;12(3):46–54. doi:10.7868/S2073667319030067
- 34. Fedorov A.M., Belonenko T.V. Interaction of mesoscale vortices in the Lofoten Basin based on the GLORYS database. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020;20: ES2002. doi:10.2205/2020ES000694
- Raj R.P., Halo I., Chatterjee S., Belonenko T., Bakhoday-Paskyabi M., Bashmachnikov I., Fedorov A., Xie J. Interaction between mesoscale eddies and the gyre circulation in the Lofoten Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020;125(7): e2020JC016102. doi:10.1029/2020JC016102
- Le Traon P.Y., Reppucci A., Alvarez Fanjul E., et al. From observation to information and users: The Copernicus Marine Service perspective. *Frontiers in Marine Science*. 2019;6: 234. doi:10.3389/fmars.2019.00234
- Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N. DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20years. *Ocean Science*. 2016;12(5):1067–1090. doi:10.5194/os-12-1067-2016
- Volkov D.L., Kubryakov A., Lumpkin R. Formation and variability of the Lofoten Basin vortex in a high-resolution ocean model. *Deep Sea Research*. Part I. 2015;105:142–157. doi:10.1016/j.dsr.2015.09.001
- Gaube P., McGillicuddy Jr.D.J., Moulin A.J. Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally. *Geophysical Research Letters*. 2019;46:1505–1512. doi: 10.1029/2018GL080006
- 40. Gordeeva S., Zinchenko V., Koldunov A., Raj R.P., Belonenko T. Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten Basin from satellite altimetry. Advances in Space Research. 2021;68(2):364–377. doi:10.1016/j.asr.2020.05.043
- 41. Sandalyuk N.V., Belonenko T.V. Three-Dimensional Structure of the mesoscale eddies in the Agulhas Current region from hydrological and altimetry data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021;21: ES4005. doi:10.2205/2021ES000764
- 42. Sandalyuk N.V., Bosse A., Belonenko T.V. The 3-D structure of mesoscale eddies in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea: A composite analysis from altimetry and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2020;125: e2020JC016331
- Yu L.-S., Bosse A., Fer I., Orvik K.A., Bruvik E.M., Hessevik I., Kvalsund K. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017;122:6814–6834. doi:10.1002/2017JC012982
- 44. Rossby T., Ozhigin V., Ivshin V., Bacon S. An isopycnal view of the Nordic seas hydrography with focus on properties of the Lofoten Basin. *Deep Sea Research*. Part I. 2009;56(11):1955–1971. doi:10.1016/j.dsr.2009.07.005
- 45. Andersson M., LaCasce J.H., Koszalka I., Orvik K.A., Mauritzen C. Variability of the Norwegian Atlantic Current and associated eddy field from surface drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011;116: C08032. doi:10.1029/2011JC007078
- 46. Koszalka I., LaCasce J.H., Andersson M.K., Orvik A., Mauritzen C. Surface circulation in the Nordic seas from clustered drifters. *Deep Sea Research*. Part I. 2011;58:468–485. doi:10.1016/j.dsr.2011.01.007
- 47. Søiland H., Rossby T. On the structure of the Lofoten Basin Eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013;118:4201-4212. doi:10.1002/jgrc.20301
- Belonenko T.V., Koldunov A.V., Sentyabov E.V., Karsakov A.L. Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea based on in-situ and model data. *Vestn. S.-Peterb. Univ., Nauki Zemle.* 2018; 63(4): 502–519. doi:10.21638/spbu07.2018.406
- 49. Bosse A., Fer I., Søiland H., Rossby T. Atlantic water transformation along its poleward pathway across the Nordic Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2018;123: 6428–6448. doi;10.1029/2018JC014147
- 50. Travkin V.S., Belonenko T.V. Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019;19: ES5004. doi:10.2205/2019ES000676
- 51. Raj R.P., Chafik L., Even J., Nilsen O., Eldevik T., Halo I. The Lofoten vortex of the Nordic seas. *Deep Sea Research*. Part I. 2015;96:1–14. doi:10.1016/j.dsr.2014.10.011
- Raj R.P., Johannessen J.A., Eldevik T., Nilsen J.E.O., Halo I. Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin. *Journal of Geophysical Research*. 2016;121:4503–4521. doi:10.1002/2016JC01163.7

- 53. Köhl A. Generation and stability of a quasi-permanent vortex in the Lofoten Basin. *Journal of Physical Oceanography*. 2007;37(11):2637–2651. doi:10.1175/2007jpo3694.1
- 54. Belonenko T.V., Volkov D.L., Ozhigin V.K., Norden Yu.E. Water circulation in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea. *Vestn. S.-Peterb. Univ., Ser. 7: Geol., Geogr.* 2014;2:108–121 (In Russ.).
- 55. Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V., Kuibin P.A. Application of the theory of columnar Q-vortices with helical structure for the Lofoten vortex in the Norwegian Sea. *Vestn. S.-Peterb. Univ., Nauki Zemle.* 2017;62(3):221–336. doi:10.21638/11701/spbu07.2017.301
- Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Vesman A.V., Belonenko T.V., Dukhovskoy D.S.. Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 2: Indices of intensity of deep convection. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019;16(1):191–201. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-1-191-201
- Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Vesman A.V., Belonenko T.V., D.S. Dukhovskoy. Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 1: Localization of the deep convection sites. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018;15(7):184–194. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194
- Bashmachnikov I.L., Sokolovskiy M.A., Belonenko T.V., Volkov D.L., Isachsen P.E., Carton X. On the vertical structure and stability of the Lofoten Vortex in the Norwegian Sea. *Deep Sea Research*. Part I. 2017;128;1–27. doi:10.1016/j.dsr.2017.08.001
- 59. Okubo A. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* 1970;17:445–454. doi:10.1016/0011-7471(70)90059-8
- 60. Weiss J. The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics. *Physica D*. 1991;48(2–3):273–294. doi:10.1016/0167-2789(91)90088-q
- Travkin V.S., Belonenko T.V., Budyansky M.V., Prants S.V., Uleysky M.Y., Gnevyshev V.G., et al. Quasi-Permanent Mushroom-like Dipole in the Lofoten Basin. *Pure and Applied Geophysics*. 2022;179(1):465–482. doi:10.1007/s00024-021-02922-9
- 62. Griffiths R.W., Hopfinger E.J. Coalescing of geostrophic vortices. *Journal of Fluid Mechanics*. 1987;178:73–97. doi:10.1017/S0022112087001125
- 63. Kirchhoff G. Vorlesungen über matematische Physic: Mechanik. Leipzig: Teubner; 1876. 489 p.

About the Authors

- ZHMUR, Vladimir V., Head of the Laboratory, Chief Researcher, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, SPIN-code (РИНЦ): 5553-8019, ORCID: 0000-0001-8217-0932, WoS ResearcherID: P-9738-2015, Scopus AuthorID: 6602162918, e-mail: zhmur-vladimir@mail.ru
- BELONENKO, Tatyana V., Professor of the Department of Oceanology at St. Petersburg State University, SPIN-code (РИНЦ): 1978-1620, ORCID: 0000-0003-4608-7781, Scopus Author ID: 6507005889, WoS ResearcherID: K-2162-2013, e-mail: btvlisab@yandex.ru
- NOVOSELOVA, Elena V., Researcher at St. Petersburg State University and Nansen International Environmental and Remote Sensing Center Scientific Foundation, SPIN-code (РИНЦ): 3244-7881, ORCID: 0000-0002-6319-8937, WoS ResearcherID: AAZ-6650-2020, Scopus AuthorID: 57219992097, e-mail: novoselovaa.elena@gmail.com
- SUETIN, Boris P., Postgraduate student at the Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Scopus AuthorID: 58153398500, e-mail: suetinboris@gmail.com

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2

УДК 551.465

© А. В. Исаев*, В. А. Рябченко, 2024

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36 *isaev1975@gmail.com

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД С 1980 ПО 2020 ГОДЫ

Статья поступила в редакцию 19.09.2024, после доработки 12.11.2024, принята в печать 16.11.2024

Аннотация

Многочисленные обобщения, основанные на натурных исследованиях, показывают, что пространственно-временное покрытие Ладожского озера данными наблюдений недостаточно для надёжной количественной оценки межгодовой изменчивости характеристик и биогеохимических потоков в экосистеме озера. В настоящей работе представлены оценки межгодовой динамики основных характеристик экосистемы и биогеохимических потоков в озере в период с 1980 по 2020 гг., полученные с помощью верифицированной трёхмерной эко-гидродинамической модели Ладожского озера. Выявлены особенности реакции экосистемы озера на снижение внешней фосфорной нагрузки на 39 % в течение исследуемого периода, которое сопровождается снижением биомассы и первичной продукции фитопланктона только на 30 %. Основным механизмом, объясняющим указанную реакцию экосистемы водоема, является увеличение скорости рециклинга за счет увеличения температуры воды в фотическом слое в вегетативный период, обусловленного изменением климата. Оценено время оборота фосфора в озере, которое составило примерно 5,4 года для рассматриваемого периода времени 1980–2020 гг.

Ключевые слова: межгодовая изменчивость, экосистема, биогеохимические потоки, математическое моделирование, Ладожское озеро

UDC551.465

© A. V. Isaev*, V. A. Ryabchenko, 2024

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia *isaev1975@gmail.com

MODEL ESTIMATES OF INTERANNUAL VARIABILITY OF THE LAKE LADOGA ECOSYSTEM CHARACTERISTICS IN THE PERIOD FROM 1980 TO 2020

Received 19.09.2024, Revised 12.11.2024, Accepted 16.11.2024

Abstract

Numerous generalizations based on field studies show that the spatiotemporal coverage of Lake Ladoga with observational data is insufficient for a reliable quantitative assessment of the interannual variability of the characteristics and biogeochemical fluxes in the lake ecosystem. This paper presents estimates of the interannual dynamics of the main ecosystem characteristics and biogeochemical fluxes in the lake for the period from 1980 to 2020, obtained using a verified three-dimensional eco-hydrodynamic model of Lake Ladoga. The features of the lake ecosystem response to a 39 % decrease in the external phosphorus load during the study period, which is accompanied by a decrease in phytoplankton biomass and primary production by only 30 %, are revealed. The main mechanism explaining this response of the reservoir ecosystem is an increase in the recycling rate due to an increase in water temperature in the photic layer during the growing season, caused by climate change. The phosphorus turnover time in the lake was estimated to be approximately 5.4 years for the considered period of 1980–2020.

Keywords: interannual variability, ecosystem, biogeochemical fluxes, mathematical modeling, Lake Ladoga

Ссылка для цитирования: *Исаев А.В., Рябченко В.А.* Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. 32–42. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2

For citation: Isaev A.V., Ryabchenko V.A. Model Estimates of Interannual Variability of the Lake Ladoga Ecosystem Characteristics in the Period From 1980 to 2020. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):32–42. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2

Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020

1. Введение

Ладожское озеро является самым большим стратифицированным озером Европы расположенном на Северо-Западе России в бореальной зоне. Площадь водного зеркала озера составляет 17680 км², а объем 848 км³ [1]. Акватория Ладожского озера является важнейшим водным ресурсом Северо-Запада России, имеющим исключительное народно-хозяйственное значение. Водные ресурсы озера используются как источник питьевого снабжения Санкт-Петербурга и Ленинградской области, так и обеспечения многочисленных промышленных предприятий [2, 3]. Во многом экосистема Ладожского озера уникальна в силу своего расположения в северных широтах. Поэтому исследование динамики экосистемы озера при антропогенном воздействии в условиях изменения климата является важной научной задачей, имеющей социально-экономическое приложение.

К настоящему моменту выполнено достаточно много исследований изменчивости экосистемы Ладожского озера, основанных на данных натурных и дистанционных измерений [2, 4–7]. В результате этих исследований получены оценки реакции экосистемы на изменения поступления биогенных элементов и изменения климата. Обобщение этих исследований подробно изложено в недавней монографии [2]. Однако, в силу методических и организационных ограничений при выполнении натурных исследований, пространственно-временное покрытие данными акватории озера недостаточно для количественного описания сложных многофакторных взаимодействий и потоков в озерной экосистеме.

Одним из возможных способов восполнить пробелы в изучении динамики экосистемы озера, связанные с ограниченностью натурных исследований, является математическое моделирование. В прошлые годы было разработано несколько моделей Ладожского озера [8–12], с помощью которых были выполнены различные оценки реакции экосистемы на изменчивость внешних воздействий. Однако из-за ограничений моделей не была прослежена динамика межгодовой изменчивости экосистемы с учетом межгодовой изменчивости внешних воздействий и процессов на границе раздела вода — донные отложения.

В нашей недавней работе [13] была представлена трехмерная модель экосистемы Ладожского озера с учетом бентосного слоя, которая показала хорошее соответствие между результатами моделирования и данными наблюдений, что позволяет использовать её для оценки межгодовой динамики основных экосистемных характеристик и биогеохимических потоков.

Для восполнения неполноты в оценке динамики экосистемы Ладожского озера по данным натурных наблюдении в настоящей работе выполнен анализ смоделированной межгодовой динамики содержания и потоков фосфора, а также биомассы и первичной продукции фитопланктона.

2. Материалы и методы

Межгодовая изменчивость экосистемы Ладожского озера была рассчитана с использованием трехмерной эко-гидродинамической модели, подробное описание которой приведено в [13]. Вкратце перечислим основные особенности этой модели. Она включает в себя два модуля: гидродинамический и биогеохимический. Гидродинамический модуль основан на модели общей циркуляции Массачусетского университета MITgcm [14, 15], которая, помимо системы уравнений гидротермодинамики водоёма, включает модули моделирования ледяного покрова, и решения уравнений адвекции-диффузии неконсервативной примеси, необходимые для реализации модели биогеохимических циклов. Биогеохимический модуль описывает основные биогеохимические процессы циклов минерального, взвешенного и растворенного органического азота и фосфора, а также растворенного кислорода, с учетом динамики азота и фосфора в донных отложениях. Модель биогеохимических циклов основана на модели SPBEM, разработанной для Балтийского моря [16], которая в дальнейшем успешно применялась для Онежского и Ладожского озер [13, 17, 18]. Верификация совместной эко-гидродинамической модели по данным натурных наблюдений была проведена в [13] и оказалась успешной. При выполнении обсуждаемых здесь расчетов на период 1980-2020 гг. в качестве граничных условий для гидродинамических характеристик задавались поля атмосферного воздействия из архива peanaлиза ERA-5 (https://www.ecmwf.int) и речной сток по данным натурных наблюдений [1, 2]. Граничные условия, обуславливающие поступление вещества в экосистему, включали поступление биогенных элементов (азота и фосфора) с речным стоком и их выпадение из атмосферы [1, 2]. Граничными условиями, обеспечивающими вывод вещества за границы моделируемой системы, были вынос со стоком р. Нева и захоронение биогенных элементов в донных отложениях.

Подробное описание задаваемой нагрузки биогенными элементами (азотом и фосфором) на озеро дано в работе [12]. Межгодовая изменчивость поступления общего фосфора в Ладожское озеро из внешних



Рис. 1. Межгодовая изменчивость общего фосфора, поступающего из внешних источников в Ладожского озеро

Fig. 1. Interannual variability of the annual input of total phosphorus from external sources to Lake Ladoga

источников приводится на рисунке 1. Межгодовую изменчивость поступления общего фосфора в Ладожское озеро в исследуемый период 1980–2020 гг. можно разделить на 3 временных интервала: 1) период 1980–1992 гг. с высокой внешней нагрузкой, для которого средняя годовая нагрузка составляла 5900 тонн фосфора, 2) период резкого сокращения нагрузки, который наблюдался с 1993 по 1996 гг., и 3) период 1996–2020 гг., для которого среднее годовое поступление фосфора составляло 3350 тонн фосфора.

3. Результаты и обсуждения

3.1. Межгодовая изменчивость температуры

Температура является одной из важнейших гидрофизических характеристик, которая обуславливает изменчивость в пространстве и времени биогеохимических характеристик. Поэтому, предваряя анализ пространственно-временной изменчивости биогеохимических характеристик, рассмотрим межгодовую изменчивость как среднегодовой, осредненной по всему объёму озера, так и средней за вегетативный период (май—октябрь), осреднённой по фотическому слою, температуры воды (рис. 2). Межгодовая изменчивость обеих этих характеристик за период исследований имеет выраженный тренд на повышение. Рост среднегодовой температуры всего озера за весь рассматриваемый период составляет 0,76 °C, в то время как повышение средней температуры фотического слоя в летний период оказалось равным 1,5 °C, т. е. примерно в 2 раза больше. Другими словами, реакция фотического слоя озера на изменения климата оказалась гораздо больше реакции его глубинных слоёв.



Рис. 2. Межгодовая изменчивость среднегодовой, осредненной по всему объему озера (1), и средней за вегетативный период (май–октябрь), осреднённой по фотическому слою (2), температуры воды по результатам моделирования

Fig. 2. Interannual variability of the average annual temperature, averaged over the entire volume of the lake (1), and the average temperature for the growing season (May–October), averaged over the photic layer (2), of the water according to the results of modeling

Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020

3.2. Временная изменчивость биогеохимических характеристик

Основными биогеохимическими параметрами, которые характеризуют изменчивость состояния экосистемы водного объекта, являются биомасса фитопланктона и его первичная продукция, а также биогенные элементы, лимитирующие производство органического вещества в процессе фотосинтеза, т. е. в случае фосфорной лимитации, существующей в Ладожском озере, — это различные формы фосфора. Суточная динамика осредненных по объему озера общего фосфора и фосфатов, а также биомассы и первичной продукции фитопланктона в фотическом слое в исследуемый период 1980–2020 гг. представлена на рис. 3. Заметим, что чистая первичная продукция диатомового и не-диатомового фитопланктона, смоделированная в единицах веса азота, была переведена в единицы веса углерода с коэффициентом 5,7 мг С мг⁻¹ N. Этот коэффициент рассчитан на основании предположения о том, что классическое молярное соотношение Редфилда C: N: P = 106 : 16 :1 справедливо и для пресноводного фитопланктона, включая бореальные озера [19–23]. Биомасса диатомового и не-диатомового фитопланктона, включая бореальные озера [19–23]. Биомасса диатомового и не-диатомового фитопланктона, сооделированная в азотных единицах, была пересчитана в единицы сырого веса, предполагая, что содержание азота составляет соответственно 0,5 % и 1 % от биомассы диатомовых и не-диатомовых водорослей [20, 24].



Рис. 3. Воспроизведенная среднесуточная динамика осредненных по объему озера общего фосфора и фосфатов (*a*), осредненной по фотическому слою биомассы фитопланктона (*б*) и интегральной (по фотическому слою) первичной продукции (*в*) в период 1980–2020 гг.

Fig. 3. Simulated long-term dynamics of lake volume-averaged total phosphorus and phosphates (*a*), photic layer-averaged phytoplankton biomass (*b*) and integral (photic layer) primary production (*c*) in the period 1980–2020

Воспроизведенная межгодовая изменчивость содержания общего фосфора и минерального фосфора в водной среде озера отражает динамику внешней биогенной нагрузки (рис. 3 и рис. 1), хотя и сдвинуто по времени. Можно выделить период с 1980 по 1995 гг. с высокой среднегодовой концентрацией общего фосфора ($25,8 \pm 1,16 \text{ мг/m}^3$), период её снижения в 1995–2003 гг. и период 2003–2020 гг., для которого характерна низкая среднегодовая концентрация ($16,3 \pm 0,87 \text{ мг/m}^3$). Воспроизведенное среднегодовое содержание минерального фосфора для периода с 1980 по 1995 гг. составляет 12,59 ± 1,84 мг/м³, а для периода с 2003 по 2020 гг. — 7,56 ± 1,34 мг/м³. В дальнейшем анализе будет рассматриваться именно такое деление исследуемого периода на 3 интервала: высокой, промежуточной и низкой нагрузки. Таким образом, снижение содержания фосфора в водах Ладожского озера между периодами высокой и низкой биогенной нагрузки составляет около 40 % как для общего, так и для минерального фосфора. Отметим временной сдвиг в 3–4 года между началом снижения внешней нагрузки и началом снижения содержания фосфора в озере. Ниже будет дано объяснение этому временному сдвигу.

Сравним рассчитанные значения общего и минерального фосфора с данными многолетних наблюдений Ладожского озера с 1976 по 2019 гг. в безлёдный период, обобщёнными в [2, см. рис. 8.4.8]. Согласно этой монографии, диапазон изменчивости концентрации общего фосфора в период с 1981 по 1984 гг. составляет от 23–24 мг/м³, а в период с 1988 по 1992 гг. 21–22 мг/м³. Модельная средняя (за безлёдный период с мая по октябрь) концентрация общего фосфора составляет 25,26 \pm 0,91 мг/м³ в период 1980–1992 гг. При низкой внешней биогенной нагрузке наблюдаемая концентрация общего фосфора составляет 11–13мг/м³ в среднем за 2003–2010 гг., в то время как по результатам моделирования она равна 16,28 \pm 0,71 мг/м³ в среднем за тот же период. Таким образом, воспроизведенная концентрация общего фосфора на протяжении всего исследуемого периода превышает оценки по данным наблюдений на 3–5 мг/м³.

Изменения концентрации минерального фосфора аналогичны изменениям общего фосфора. Средняя многолетняя концентрация фосфатов в безлёдный период по результатам моделирования составляет 11,01 ± 1,19 мг/м³ в 1980–1995 гг. и 6,49 ± 0,61 мг/м³ в 2003–2020 гг. Оценки, приведенные в [2, см раздел 8] показывают, что в период высокой внешней нагрузки концентрация минерального фосфора в водной среде озера составляла 8–13 мг/м³, тогда как в период низкой нагрузки (с 2003 по 2020 гг.) — 2–6 мг/м³.

Воспроизведенная долгосрочная динамика биомассы фитопланктона устойчиво воспроизводит характерную сезонную закономерность: сильное весеннее цветение фитопланктона, переходящее в летнюю квазистационарную фазу, за которой следует слабое осеннее цветение (рис. 3). Что касается межгодовой динамики биомассы фитопланктона, отметим три описанных выше временных интервала с разным характером изменчивости, на которых, в отличие от фосфора, изменения биомассы фитопланктона выражены не столь ярко. Оценки средних по акватории озера значений рассчитанной биомассы фитопланктона показывают, что для периода 1980–1995 гг. средняя биомасса в вегетативный период (май-октябрь) составляет 1,5 ± \pm 0,7 г/м³, а для периода 2003–2020 гг. 0,8 ± 0,5 г/м³. Максимальные значения биомассы в период весеннего цветения диатомовых водорослей достигают 4–4,5 г/м³ в первый из обозначенных временных интервалов и 2–3 г/м³ – во второй (рис. 3).

Согласно [6], биомасса фитопланктона в озере в период с 1992 по 2009 гг. изменялась в диапазоне от 1,2 до 1,9 г/м³. Максимальные значения биомассы фитопланктона, измеренные на отдельных станциях, могли достигать значений в диапазоне от 3,5 до 9,9 г/м³. Обобщение данных натурных измерений биомассы фитопланктона для июля-августа в период с 1992 по 2019 гг., представленное в [2, см. раздел 9] показывает, что в данный период не наблюдается выраженного тренда в межгодовой изменчивости биомассы фитопланктона, причём характерные значения биомассы составляют от 0,8 до 1,5 г/м³, достигая в отдельные годы 2,5 г/м³. В то же время в период весеннего цветения биомасса фитопланктона в различных районах озера находилась в диапазоне от 1,0 до 3,5 г/м³.

Смоделированная первичная продукция фитопланктона в целом повторяет сезонные и межгодовые особенности, описанные для биомассы фитопланктона. Воспроизведенные уровни первичной продукции изменяются в диапазоне 550–850 мгС/м²/сут, достигая в отдельные годы максимальных значений 1000–1200 мгС/м²/сут, для периода 1980–1995 гг. и уменьшаются до 250–500 мгС/м²/сут для периода 2003–2020 гг. Так, в работе [4] отмечается, что в период с 1978 по 1989 гг. значения первичной продукции в летний период находились в диапазоне 150–1100 мгС/м²/сут. Оценки средней за период 1993–2003 гг. первичной продукции, представленные в [1], составляют 400 мгС/м²/сут.

Подводя итог рассмотрению межгодовой динамики биомассы фитопланктона и первичной продукции, можно сделать вывод, что, учитывая ограниченное пространственно-временное покрытие акватории озера данными натурных наблюдений, модель достаточно хорошо воспроизводит межгодовую динамику как биомассы фитопланктона, так и первичной продукции.
Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020

3.3. Пространственная изменчивость биогеохимических характеристик

Сравнение среднемноголетних полей за периоды с высокой и низкой внешней биогенной нагрузкой показали, что значимых различий в пространственном распределении биогеохимических характеристик не наблюдается. В связи с этим описание особенностей пространственного распределения биогеохимических характеристик выполнено с использованием осредненных за весь период моделирования (1980–2020 гг.) значений этих характеристик. На рис. 4 представлены зимняя (апрель) концентрация минерального фосфора, средняя за вегетативный период (май—октябрь) биомасса фитопланктона и годовая первичная продукция диатомовых и не-диатомовых водорослей.

В распределении фосфатов в фотическом слое в апреле отмечаются следующие основные особенности. Основными реками, впадающими в Ладожское озеро и со стоком которых поступает от 60 до 80 % фосфорной нагрузки, являются Волхов, Свирь, Сясь и Вуокса. Поэтому максимальные концентрации 25-30 мг/м³ наблюдаются в Волховской и Свирской губах, а также в районе впадения реки Вуокса. Концентрации фосфатов в диапазоне 15-20 мг/м³ отмечаются также вдоль восточного побережья озера по направлению на север от Свирской губы, что обусловлено влиянием речного стока. За пределами зон интенсивного влияния речного стока среднемноголетняя концентрация фосфатов в период максимального зимнего накопления изменяется в диапазоне от 8 до 15 мг/м³.

Особенности пространственной изменчивости среднемноголетней биомассы фитопланктона в вегетативный период в основном определяются распределением зимних запасов минерального фосфора (рис. 4, δ). Максимальные значения биомассы, составляющие 8–10 г/м³, приходятся на районы максимальных концентраций зимних фосфатов, поскольку в них в течение всего вегетативного периода существует достаточно интенсивный приток доступных для фитопланктона биогенных элементов, поступающих с водами впадающих рек. На остальной акватории озера среднемноголетняя биомасса фитопланктона изменяется в диапазоне 0,5–1 г/м³ в центральной и северной частях озера, и 1,5–2,0 г/м³ – в Волховской и Свирской губах, где еще ощущается влияние поступающих с водосбора биогенных элементов.

Воспроизведенные особенности пространственного распределения фосфатов и биомассы фитопланктона, достаточно хорошо согласуются с представлениями о пространственной изменчивости этих характеристик экосистемы Ладожского озера, полученными на основе данных экспериментальных исследований [2].

Фитопланктон в Ладожском озере представлен различными видами диатомовых и не-диатомовых водорослей. Основной особенностью сезонной сукцессии фитопланктона является то, что весеннее цветение в основном определяется холодолюбивыми диатомовыми водорослями, в то время как поздней весной и летом доминируют не-диатомовые водоросли [2]. Для анализа особенностей пространственной изменчивости диатомовых и не-диатомовых водорослей были построены карты годовой первичной продукции, осредненные за период с 1980 по 2020 гг. Подобрать периоды осреднения внутри годового цикла для более точного представления среднемноголетнего распределения отдельных групп фитопланктона не представляется возможным. Это связано с тем, что время начала вегетативного периода определяется временами исчезновения ледяного покрова и прохождения термобара, которые характеризуются сильной межгодовой изменчивостью.

Представленные на рис. 4, в-е годовые интегралы первичной продукции показывают, что основной вклад в суммарную годовую продукцию вносит не-диатомовый планктон. Максимальные значения годовой первичной продукции 300-400 гС/м²/год не-диатомовых водорослей отмечаются в районах с максимальной биомассой, причем в центральном и северном районах озера годовая первичная продукция не-диатомового фитопланктона составляет от 15 до 25 гС/м²/год. Годовые значения воспроизведенной первичной продукции диатомового планктона изменяются в диапазоне от 5 до 20 гС/м²/год. При этом его минимальные значения наблюдаются вдоль южного и восточного побережья, а максимальные — в центральной и северной частях озера. Эту особенность можно объяснить тем, что в мелководных южных и восточных прибрежных районах после начала вегетативного периода достаточно быстро происходит прогрев фотического слоя, который приводит к смене видового состава фитопланктона с диатомового на не-диатомовый. В глубоководных центральном и северном районах прогрев происходит значительно дольше, что приводит к увеличению периода цветения диатомовых водорослей, продолжающегося от момента начала цветения до момента достижения оптимальной для активного развития не-диатомового фитопланктона температуры. Анализ пространственной изменчивости первичной продукции для периодов с различной внешней биогенной нагрузкой не выявил качественных различий между пространственными распределениями первичной продукции в разные периоды.

3.4. Биогеохимические потоки

Единственная оценка среднегодовых биогеохимических потоков, известная авторам настоящей работы из опубликованных исследований, — это оценка по многолетним данным средней годовой первичной



Рис. 4. Среднемноголетнее (1980–2020 гг.) распределение зимней концентрации (мг/м³) минерального фосфора (апрель) в фотическом слое (*a*), средней за вегетативный период (май– октябрь) биомассы фитопланктона (г/м³) (*б*), годовой первичной продукции (г С/м²/год) диатомовых (*в*) и не-диатомовых водорослей (*г*)

Fig. 4. Average long-term (1980–2020) distribution of winter concentration (mg/m³) of mineral phosphorus (April) in the photic layer (*a*), average phytoplankton biomass for the growing season (May–October) (g/m³) (*b*), annual primary production (g C/m2/year) of diatoms (*c*) and non-diatoms (*d*)

продукции озера в диапазоне 259-1568 тыс. т С, относящаяся к концу 1970-х гг. [2]. Восполняя этот пробел в исследованиях состояния экосистемы Ладожского озера, рассмотрим оценки среднегодовых биогеохимических потоков фосфора, включая первичную продукцию, в разные периоды времени, которые получены по результатам моделирования и представлены в табл. 1. Согласно табл. 1, средняя за период 1980–2020 гг. годовая первичная продукция составляет 1021 ± 208 тыс. т С в год, причем 20-ти процентное стандартное отклонение свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости, которая обуславливается изменчивостью внешних условий, прежде всего, температуры воды. Заметим, что средняя годовая первичная продукция в современный период (2003–2020 гг.) с низкой внешней нагрузки снизилась на 30 % по сравнению с периодом высокой нагрузки (1980–1995 гг.), несмотря на то, что среднегодовое поступление фосфора в озеро, осредненное за аналогичные периоды, сократилось на 39 %. Другими словами, снижение внешней нагрузки не привело к пропорциональному снижению продуктивности водоема. Прямого подтверждения этой закономерности в литературе найти не удалось. Однако косвенно она подтверждается тем фактом, что согласно [2, 4, 6], какие-либо тренды в межгодовой изменчивости биомассы фитопланктона, а, значит, и первичной продукции, в фотическом слое озера летом для периода с конца 1970-х по 2019 гг., когда произошло сильное снижение внешней нагрузки, отсутствуют.

Для объяснения указанной закономерности, рассмотрим средние годовые потоки фосфора, которые для фосфор-лимитированного водоема играют определяющую роль в установлении его уровня продук-

Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020

тивности. Минеральный фосфор в виде фосфатов поступает в водную колонку из следующих источников: прямое поступление с речным стоком, за счет рециклинга в водной колонке, который включает экскрецию зоопланктона и минерализацию органического вещества, а также за счет выхода из донных отложений. Экскреция зоопланктона и минерализация органического вещества зависят от температуры воды и параметризуются экспоненциальной функцией вида *a* exp(*b T*), где *a* – скорость процесса (сут⁻¹) при 0 °C, *b* – коэффициент при температуре (°C⁻¹), *T* – температура (°C) воды.

Данные табл. 1 позволяют оценить относительный вклад различных источников минерального фосфора в формирование первичной продукции фитопланктона. В целом для всего рассматриваемого периода 1980—2020 гг., вклад речного стока в обеспечении потребностей в фосфатах при производстве органического вещества составляет 8 % от общего потребления, поступление из донных отложений сопоставимо с поступлением из рек и составляет 10 %. Основной вклад в обеспечение фосфатами вносит процесс внутреннего рециклинга, который составляет 82 %. При этом 33 % обеспечивается за счет экскреции зоопланктона, а 49 % за счет минерализации, в которую включена минерализация органического вещества, поступающего с речным стоком. Сопоставляя потоки фосфора в периоды с высокой и низкой внешней биогенной нагрузкой, можно оценить, что уменьшение внутреннего рециклинга составляет около 32 %, что почти совпадает с уменьшением первичной продукции. Основной причиной описанных изменений в экосистеме, по-видимому, является увеличение температуры воды. При повышении температуры происходит увеличение скорости экскреции зоопланктона и скорости минерализации органического вещества, и, как следствие, увеличивается скорость оборачиваемости фосфора в системе, что приводит к меньшему снижению первичной продукции и биомассы фитопланктона по сравнению со снижением внешней фосфорной нагрузки.

3.5. Оценка времени оборота общего фосфора в водах озера

Для оценки времени оборота фосфора в озере воспользуемся следующей формулой: T = C V/F, где T = время оборота фосфора (годы), C - средняя концентрация фосфора в озере (мг/м³), в качестве которой обычно используется концентрация фосфора в период максимального зимнего накопления, V - объём озера (км³) и F - поступление фосфора в озеро (тонны в год). Согласно результатам расчетов, C = 26 (мг/м³) и F = 4271 тонн P/год в среднем для периода 1980–2020 гг.; объём (в соответствии с расчетной сеткой) $V = 890 \text{ км}^3$. В результате получаем, что скорость оборота фосфора в Ладожском озере составляла примерно 5.4 года для периода 1980–2020 гг.

Таблица 1

Table 1

Средние годовые биогеохимические потоки в экосистеме Ладожского озера, осредненные за различные периоды (по результатам моделирования)

Average annual biogeochemical flows in the ecosystem of Lake Ladoga, averaged over different periods
(based on modeling results)

	Годы									
	1980-2020	1980-1995	2003-2020							
Первичная продукция (стандартное отклонение), тыс. т С/год	1021 (208)	1265 (119)	878 (109)							
Потоки фосфора, тонн Р/год										
потребление фосфора фитопланктоном	25601	31694	21993							
внутренний рециклинг	21202	26718	18286							
в т. ч.										
экскреция зоопланктона	8547	10992	7455							
минерализация	12655	15726	10832							
выход из донных отложений	2601	2798	2354							
Поступление из внешних источников										
Общий фосфор	4271	5609	3436							
в том числе, минеральный фосфор	2137	2805	1719							

Как было сказано выше, существует временной сдвиг на 3–4 года между началом снижением внешней нагрузки и началом снижения концентрации фосфора в озере. При сокращении внешней нагрузки, время приспособления озера к новым нагрузкам будет определяться скоростью вывода за пределы системы накопленных под воздействием повышенной нагрузки запасов биогенных элементов, которое определяется временем их оборота. В результате возникает указанный временной сдвиг между началом снижения фосфорной нагрузки и началом снижения содержания фосфора в озере.

4. Заключение

Анализ пространственно-временной изменчивости смоделированных основных характеристик экосистемы и биогеохимических потоков Ладожского озера позволил оценить межгодовую изменчивость содержания фосфора, биомассы и первичной продукции фитопланктона в период 1980—2020 гг. Показано, что при уменьшении внешнего поступления фосфора на 39 % в период 2003—2020 гг. по сравнению с периодом 1980—1995 гг. среднегодовой уровень первичной продукции снизился меньше, на 30 %, что является следствием ускорения, за счет увеличения температуры воды, внутренних биогеохимических процессов, отвечающих за круговорот фосфора (экскреция зоопланктона и минерализация органического вещества).

На основе результатов моделирования оценено время оборота фосфора в озере, которое составило примерно 5,4 года для рассматриваемого периода времени 1980—2020 гг. Эта оценка объясняет временной сдвиг между началом снижения внешней фосфорной нагрузки и снижением содержания фосфора в водах озера.

Несмотря на достаточно хорошее совпадение результатов моделирования с данными наблюдений, необходимо дальнейшее усовершенствование модели как путём уточнения межгодовой и сезонной динамики внешних биогенных поступлений, так и посредством более тонкой настройки модельных коэффициентов.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке грантов Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

Funding

The research was supported by grants from the Russian Science Foundation (Project No. 23-17-20010) and the St. Petersburg Science Foundation (Project No. 23-17-20010).

Литература

- 1. Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
- Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата // Под редакцией С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова и В.А. Румянцева. М.: Изд. РАН, 2021. 640 с.
- 3. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Расулова А.М., Коробченкова К.Д. Ладожское озеро геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 139–161. doi:10.33933/2074–2762–2021–62–139–161
- 4. *Петрова Н.А., Антонов С.Е., Протопопова Е.В.* Структурные и функциональные характеристики фитопланктона // Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / под. ред. Н.А. Петровой, А.Ю. Тержевика. СПб., 1992. С. 119–145.
- 5. Поздняков Д.В., Коросов А.А., Петрова Н.А. и др. Исследование «гистерезисного» характера возвращения Ладожского озера из мезотрофного // Исследования земли из космоса. 2009. № 1. С. 45–59.
- 6. Летанская Г.И., Протопова Е.В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 17–24.
- 7. *Петрова Н.А., Петрова Т.Н., Сусарева О.М., Иофина И.В.* Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 580–589.
- Меншуткин В.В., Воробьева О.Н. Модель экологической системы Ладожского озера // Современное состояние Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой и Г.Ф. Растлепиной. Л.: Наука, 1987. С. 187–200.
- Rukhovets L.A., Astrakhantsev G.P., Menshutkin V.V. et al. Development of Lake Ladoga ecosystem models: modeling of the phytoplankton succession in the eutrophication process. I. // Ecological Modelling. 2003. Vol. 165(1). P. 49–77. doi:10.1016/S0304-3800(03)00061-9
- 10. Астраханцев Г.П. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Г.П. Астраханцев, В.В. Мен-

Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020

шуткин, Н.А. Петрова, Л.А. Руховец. СПб.: Наука, 2003. 363 с.

- 11. *Menshutkin V.V., Astrakhantsev G.P., Yegorova N.B.* et.al. Mathematical modelling of the evolution and current conditions of the Ladoga Lake ecosystem // Ecological Modelling. 1998. Vol. 107. P. 1–24. doi:10.1016/S0304-3800(97)00184-1
- 12. *Rukhovets L., Filatov N.* Ladoga and Onego Great European Lakes: Observations and modeling / Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2010. doi:10.1007/978-3-540-68145-8
- 13. Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5
- 14. *Marshall J., Adcrof A., Hill C.*, et al. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, N C3. P. 5753–5766. doi:10.1029/96JC02775
- 15. *Marshall J., Hill C., Perelman L.* et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, N C3. P. 5733–5752. doi:10.1029/96JC02776
- 16. *Savchuk O.P.* Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // Journal of Marine Systems. 2002. Vol. 32(4). P. 253–280. doi:10.1016/S0924-7963(02)00039-8
- 17. Исаев А.В., Савчук О.П., Филатов Н.Н. Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть I: Межгодовая изменчивость и пространственное распределение // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 76–97. doi:10.59887/fpg/e1m2-63b5-rhvg
- Савчук О.П., Исаев А.В., Филатов Н.Н. Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть II: Сезонная динамика и пространственные особенности; интегральные потоки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 98–109. doi:10.59887/fpg/9mg5-run6-4zr8
- 19. *Sterner R.W.*, *Elser J.J.* Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton University Press, 2002. 464 p.
- Reynolds C.S. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. doi:10.1017/CBO9780511542145
- 21. *Sterner R.W., Andersen T., Elser J.J.* et al. Scale-dependent carbon: nitrogen: phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters // Limnology and Oceanography. 2008. T. 53, № 3. C. 1169–1180. doi:10.4319/lo.2008.53.3.1169
- 22. *Sterner R*. C: N: P stoichiometry in Lake Superior: freshwater sea as end member // Inland Waters. 2011. Vol. 1(1). P. 29–46. doi:10.5268/IW-1.1.365
- 23. *Bergström A.-K., Karlsson J., Karlsson D.* et al. Contrasting plankton stoichiometry and nutrient regeneration in northern arctic and boreal lakes // Aquatic Sciences. 2018. Vol. 80, N2. P. 24. doi:10.1007/s00027-018-0575-2
- 24. *Menden-Deuer S., Lessard E.J.* Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // Limnology and Oceanography. 2000. Vol. 45, N3. P. 569–579. doi:10.4319/lo.2000.45.3.0569

References

- 1. Ladoga / Ed. by V.A. Rumiantsev, S.A. Kondratev. SPb.: Nestor-History; 2013, 468 p. (In Russian).
- 2. *Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate /* Ed. by S.A. Kondratev, Sh.R. Pozdniakov, V.A. Rumiantsev. Moskva: RAS; 2021. 640 p. (In Russian).
- 3. Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Rasulova A.M. et.al. Lake Ladoga is a geostrategic water body in the North-West of Russia and its zone of environmental risk. *Hydrometeorology and Ecology*. 2021;62:139–161 (In Russian).
- 4. Petrova N.A., Antonov S.E., Protopopova E.B. Structural and functional characteristics of phytoplankton. *Lake Ladoga: criteria for the state of the ecosystem /* Ed. By N.A. Petrova, A. YU. Terzhevik. SPb., 1992. P. 119–145 (In Russian).
- 5. Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., Petrova N.A. et.al. Investigation of a "Hysteretic" Nature of Lake Ladoga's Coming Back from a Mesotrophic State. *Issledovanie Zemlii z Kosmosa*. 2009;1:45–49 (In Russian).
- 6. Letanskaya G.I., Protopopova E.V. The Current State of Phytoplankton in Lake Ladoga (2005–2009). *Inland Water Biology*. 2012;5(4):310–316 (In Russian).
- 7. Petrova N.A., Petrova T.N. Susareva O.M. et al. Specific features of Lake Ladoga ecosystem under the effect of anthropogenic eutrophication. *Water Resources*. 2010;37(5):674–683.
- 8. Menshutkin V.V., Vorobieva O.N. *A model of the ecological system of Lake Ladoga. The current state of the ecosystem of Lake Ladoga.* Ed. N.A. Petrova, G.F. Raspletina. Leningrad: Nauka; 1987. p. 187–200 (In Russian).
- Rukhovets L.A., Astrakhantsev G.P., Menshutkin V.V. et al. Development of Lake Ladoga ecosystem models: modeling of the phytoplankton succession in the eutrophication process. I. *Ecological Modelling*. 2003;165(1):49–77. doi:10.1016/S0304-3800(03)00061-9
- 10. Astrakhantsev G.P., Menshutkin V.V., Petrova L.A. et al. Modeling ecosystems of large stratified lakes. SPb.: Nauka;

2003. 363 p. (In Russian).

- 11. Menshutkin V.V., Astrakhantsev G.P., Yegorova N.B. et.al. Mathematical modelling of the evolution and current conditions of the Ladoga Lake ecosystem. *Ecological Modelling*. 1998;107:1–24. doi:10.1016/S0304-3800(97)00184-1
- 12. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego Great European Lakes: Observations and modeling / Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2010. doi:10.1007/978-3-540-68145-8
- 13. Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Konik A.A. Reproduction of the Current Climatic State of the Lake Ladoga Ecosystem. *Fundamental and Appled Hydrophysics*. 2024;17(2):50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5
- 14. Marshall J., Adcrof A., Hill C., et al. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997;102(C3):5753–5766. doi:10.1029/96JC02775
- 15. Marshall J., Hill C., Perelman L., et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 1997;102(C3):5733–5752. doi:10.1029/96JC02776
- 16. Savchuk O.P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *Journal of Marine Systems*. 2002;32(4):253–280. doi:10.1016/S0924-7963(02)00039-8
- Isaev A.V., Savchuk O.P., Filatov N.N. Three-Dimensional Hindcast of Nitrogen and Phosphorus Biogeochemical Dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial Distribution. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):76–97. doi:10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg
- Savchuk O.P., Isaev A.V., Filatov N.N. Three-Dimensional Hindcast of Nitrogen and Phosphorus Biogeochemical Dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part II: Seasonal Dynamics and Spatial Features; Integral Fluxes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2): 98–109. doi:10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8
- 19. Sterner R.W., Elser J.J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton University Press; 2002. 464 p.
- Reynolds C.S. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press; 2006. doi:10.1017/CBO9780511542145
- 21. Sterner R.W., Andersen T., Elser J.J. et al. Scale-dependent carbon: nitrogen: phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters. *Limnology and Oceanography*. 2008;53(3):1169–1180. doi:10.4319/lo.2008.53.3.1169
- 22. Sterner R. C: N: P stoichiometry in Lake Superior: freshwater sea as end member. Inland Waters. 2011;1(1):29-46. doi:10.5268/IW-1.1.365
- 23. Bergström A.-K., Karlsson J., Karlsson D. et al. Contrasting plankton stoichiometry and nutrient regeneration in northern arctic and boreal lakes. *Aquatic Sciences*. 2018;80(2):24. doi:10.1007/s00027-018-0575-2
- 24. Menden-Deuer S., Lessard E.J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. *Limnology and Oceanography*. 2000;45(3):569–579. doi:10.4319/lo.2000.45.3.0569

Об авторах

- ИСАЕВ Алексей Владимирович, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0003-2005-4949, WoS ResearcherID: C-1370–2014, Scopus AuthorID: 25641182000, SPIN-код (РИНЦ): 4059-6017, e-mail: isaev1975@gmail.com
- РЯБЧЕНКО Владимир Алексеевич, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-3909-537X, WoS ResearcherID: R-3877-2016, Scopus AuthorID: 7005479766, SPIN-код (РИНЦ): 2187-1380, e-mail: vla-ryabchenko@yandex.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3

УДК 556.55

© А. В. Зимин^{1,2*}, О. А. Атаджанова¹, А. А. Коник¹, А. В. Исаев¹, 2024 ¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва ²Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 185030, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50 *zimin2@mail.ru

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-1 С ЯНВАРЯ ПО ДЕКАБРЬ 2016–2022 гг.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024, после доработки 06.10.2024, принята в печать 02.11.2024

Аннотация

В работе представлены результаты анализа многолетнего массива наблюдений за пространственно-временной изменчивостью характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Ладожского озера по радиолокационным изображениям. В качестве исходных данных использовались более 3500 высокоразрешающих спутниковых снимков Sentinel-1A/B за период с января 2016 по декабрь 2022 г. Представлены обобщенные карты повторяемости субмезомасштабных структур на акватории озера за год и по сезонам. Получены среднегодовые и сезонные оценки изменчивости средних диаметров вихрей в целом и с учетом типа вращения. Показано, что субмезомасштабные вихри являются распространенным явлением на всей акватории озера в период развития прямой термической стратификации и присутствия приповерхностного пикноклина. Чаще всего регистрировались циклонические структуры размерами до 3 км, что не превышает оценок среднего радиуса деформации Россби для Ладожского озера. Вихри чаще всего отмечались к северу от о-ва Валаам. Значительной межгодовой изменчивости в их характеристиках не прослеживалось, они были близки к средним многолетним. Выявлено наличие выраженной внутригодовой изменчивости характеристик субмезомасштабных структур как в частоте и местах встречаемости, так и в меньшей степени в их размерах. Установлено, что наиболее часто вихри наблюдались в районах с глубинами 50–100 м, вблизи областей фронтальных зон различного генезиса. На отдельных примерах показано, что неустойчивость в области фронтальных зон в Ладожском озере может быть одной из доминирующих причин появления групп малых вихрей в условиях, когда топографические эффекты и влияние ветра не должны быть существенными.

Ключевые слова: субмезомасштаб, вихри, мониторинг, спутниковые радиолокационные изображения, статистические характеристики вихревых образований, Ладожское озеро

UDC 556.55

© A. V. Zimin^{1,2*}, O. A. Atadzhanova¹, A. A. Konik¹, A. V. Isaev¹, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia
²Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 50 A. Nevskogo Pr., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185030, Russia
*zimin2@mail.ru

SUBMESOSCALE EDDIES IN LAKE LADOGA BASED ON SENTINEL-1 RADAR IMAGES FROM JANUARY TO DECEMBER 2016–2022

Received 16.09.2024, Revised 06.10.2024, Accepted 02.11.2024

Abstract

This study presents the results of the analysis of a long-term dataset of observations on the spatial-temporal variability of submesoscale eddy characteristics in Lake Ladoga using radar imagery. The initial data consisted of more than 3500 high-resolution Sentinel-1A/B satellite images for the period from January 2016 to December 2022. Generalized maps of the occurrence

For citation: *Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Konik A.A., Isaev A.V.* Submesoscale Eddies in Lake Ladoga Based on Sentinel-1 Radar Images from January to December 2016–2022. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):43–54. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3

Ссылка для цитирования: Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Исаев А.В. Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1 с января по декабрь 2016—2022 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 43—54. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3

of submesoscale structures on the lake's waters for the year and by seasons are presented. Average annual and seasonal estimates of the variability of the mean diameters of eddies with different type of rotation were obtained. It was shown that submesoscale structures are a common phenomenon throughout the lake during the period of direct thermal stratification and the presence of a near-surface pycnocline. Cyclonic structures with sizes up to 3 km were most frequently registered, which does not exceed the estimates of the average Rossby deformation radius for Lake Ladoga. Eddies were most often observed north of Valaam Island. No significant interannual variability in their characteristics was found; they were close to the average multi-year values. A pronounced intrayear variability in the characteristics of submesoscale structures was revealed, both in frequency and locations, and to a lesser extent in their sizes. It was established that eddies were most frequently observed in areas with depths of 50–100 meters, near frontal zones of different genesis. In specific cases, the instability in frontal zones in Lake Ladoga appears to be a dominant factor in the formation of small eddy groups, especially in the absence of significant topographic effects or wind influence.

Keywords: submesoscale, eddies, monitoring, satellite radar images, statistical characteristics of eddy formations, Lake Ladoga

1. Введение

В крупных озерах, имеющих характерный размер порядка десятков и сотен километров, т. е. больше оценок радиуса деформации Россби, круговороты масштаба бассейна (мезомасштабные) преобладают в циркуляции и играют ключевую роль в горизонтальном и вертикальном распределении физических, химических и биологических параметров по всему водоему. Они формируются под влиянием ветра, термодинамического обмена, стока рек, а модифицируются силой Кориолиса, особенностями рельефа дна и положением берегов [1, 2].

Кроме мезомасштабной циркуляции в озерах часто возникают вихри меньшего масштаба (от сотен метров до единиц километров), влияние силы Кориолиса на которые не является полностью определяющим [3]. Они относятся к субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрофизических полей [4]. Вихревые структуры данного размера не описываются целиком положениями квазигеострофического приближения и в то же время не являются в полной мере изотропно трехмерными, негидростатическими процессами. Они имеют характерное время существования от часов до суток. Считается, что субмезомасштабные вихри характеризуются значительной вертикальной скоростью, поэтому играют важную роль в особенностях локального вертикального и горизонтального перемешивания [4, 5]. Анализ спутниковых изображений с высоким пространственным разрешением (оптические снимки и радиолокационные изображения (РЛИ)) позволил сделать очевидным вывод о распространённости малых (субмезомасштабных) структур во многих озерах: озеро Верхнее (Северная Америка) [6], Скадарское озеро в Черногории/Албании [7], Ладожское и Онежское озера в России [8–10], Женевское озеро в Швейцарии [11], Севан в Армении [12]. Но стоит отметить, что в большинстве случаев представленные исследования основываются на рассмотрении незначительного числа проявлений вихревых структур.

Считается, что в районах частой повторяемости субмезомасштабные структуры оказывают влияние не только на динамику вод, но и на биогеохимические процессы и, соответственно, биологическую продуктивность [5] как в морях, так и в крупных водоемах. В результате информация о районах частой регистрации субмезомасштабных вихрей, их сезонной и межгодовой изменчивости важна для углубления понимания динамических и биологических процессов, протекающих в озерах. Этот вопрос весьма актуален, так как изменения климата и возрастающая антропогенная нагрузка может привести к эвтрофикации многих озёр России [1], в том числе, Ладожского озера. Значение Ладожского озера определяется тем, что оно является основным источником водоснабжения одного из крупнейших городов России — Санкт-Петербурга. Спрогнозировать развитие процессов в Ладожском озере можно на основе вихреразрешающих гидродинамических моделей высокого пространственного разрешения [13]. Однако их развитие невозможно без наличия обеспеченной многолетней информационной базы о проявлениях субмезомасштабных вихрей в течение всего года на акватории озера.

Одним из наиболее масштабных по использованному материалу для исследований проявлений субмезомасштабных вихрей в Ладожском озере является работа [9], в которой на основе анализа 1023 РЛИ, покрывающих акваторию Ладожского озера, за май-октябрь 2019—2022 гг. было детектировано 496 вихревых структур. Среди них отмечались как отдельные вихри, так и дипольные структуры, а также вихревые дорожки. Средний диаметр вихрей составил 2 км, что не превышает бароклинного радиуса Россби, размер которого в Ладожском озере колеблется от 2 до 5 км [14]. Циклонический тип вращения имели 80 % структур. Чаще всего вихри регистрировались в озере в период развития устойчивой стратификации. Значительное число вихрей, отмечаемое во время активного движения термобара в мае-июле, позволило обосновать

Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1... Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January...

предположение о том, что они оказывают значительное влияние на обмен между теплоактивной и теплоинертной областями озера даже в условиях слабых ветров. Однако данное исследование не охватывает холодную часть года, а полученные статистические оценки среднемесячной изменчивости основываются на сравнительно небольших статистических выборках и не могут служить достоверным основанием для совершенствования существующих гидродинамических моделей озера.

Поэтому цель работы — представление первых результатов обобщающего анализа изменчивости характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Ладожского озера по радиолокационным изображениям за период с января по декабрь 2016–2022 гг.

2. Материалы и методы

Для исследования поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур на акватории Ладожского озера использовались спутниковые данные радиолокаторов с синтезированной апертурой со спутников Sentinel-1 A/B. Всего с января по декабрь 2016—2022 гг. было проанализировано 3552 РЛИ в С-диапазоне и режимах съемки Interferometric Wide (IW) с разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км и Extra-Wide Swath (EW) с разрешением 40 м и шириной полосы обзора 400 км. Распределение изображений по акватории за весь рассматриваемый период представлено на рис. 1, *а*. Максимальное покрытие отмечается в полосе в центральной части бассейна с количеством от 1500 до 1700 изображений. Меньше всего покрыта область восточной части озера, на весь период которого приходится не более 800 изображений. В среднем за год на акваторию озера приходилось 507 снимков. Наименее обеспеченными отмечаются 2016 и 2022 гг., когда число изображений составило около 300 за каждый год. С 2017 по 2021 на каждый год пришлось почти в два раза больше изображений. В месяц в среднем количество спутниковых изображений составило 296 шт. Наименее обеспеченным месяцем является июнь — всего 264 РЛИ, в то время как максимум РЛИ приходится на декабрь — 340 шт.

Регистрация вихрей на РЛИ выполнялась на основе метода, подробно представленного в работах [15, 16]. В программном обеспечении SNAP начальные изображения были откалиброваны и сглажены для уменьшения шумов с помощью фильтра Ли [17]. Затем на каждом отдельном РЛИ (рис. 1, *б*) вручную находились закрученные в дуги темные контрастные полосы (относительно фона), которые образовались



Рис. 1. Карта покрытия РЛИ (*a*) и фрагмент РЛИ Sentinel-1 от 07.08.2019 15:24 UTC (*б*) с проявлением вихря и иллюстрацией методики. Цифрами на *a* обозначены: *1* — остров Валаам, *2* — бухта Петрокрепость, *3* — Свирская губа, *4* — Волховская губа, *5* — устье реки Волхов, *6* — устье реки Сясь, *7* — устье реки Свирь, *8* — устье реки Олонка

Fig. 1. Radar coverage map (*a*) and a fragment of Sentinel-1 radar imagefrom 07.08.2019 15:24 UTC (*b*) with manifestation of eddy and an illustration of the methodology. The numbers in *a* indicate: 1 - Valaam Island, 2 - Petrokrepost Bay, 3 - Svirskaya Bay, 4 - Volkhov Bay, 5 - mouth of the Volkhov River, 6 - mouth of the Syas River, 7 - mouth of the Svir River, 8 - mouth of the Olonka River

за счет накопления поверхностных пленок в областях конвергенции поверхностных течений [18, 19]. Если данные проявления можно было вписать в эллипс, то его принимали за проявление вихревой структуры. Центр выделенной на радиолокационном изображении спирали принимался за центр вихревой структуры («Ц» на рис. 1, δ). Тип закрутки вихревой структуры (циклонические — Cn и антициклонические — Ac) определялся на изображении визуально по направлению закрутки спирали, а средний диаметр рассчитывался в среде MathWorks ©Matlab на основе длин двух квазиперпендикулярных осей («Д1» и «Д2» на рис. 1, δ), которые проводились через центр выделенной структуры и заканчивались на наиболее удаленной темной спиральной линии. Стоит учитывать, что данный метод идентификации границ выделяемых вихревых структур имеет весомую долю субъективности, тем не менее на его основе удалось проанализировать свойства и распространенность поверхностных проявлений вихрей для различных морей Арктики [15, 16, 20] и Онежского и Ладожского озер [9, 10].

Дополнительно привлекались изображения сканеров цвета спутника Sentinel-2A/B MSI с пространственным разрешением 10 м. Цветные изображения использовались в период малооблачной погоды за даты, близкие по времени к РЛИ при наличии нескольких вихревых проявлений. Для оценки температуры поверхности в зоне проявлений вихрей привлекались данные спектрорадиометров MODIS спутников Aqua/Terra, а таже измерения радиометра VIIRS, работающего в УФ, ИК и видимом диапазоне спутника Suomi NPP с уровнем обработки L2 за даты, общие для оптических и радиолокационных изображений. Пространственное разрешение спутниковых данных температуры составило около 1 км. Регистрация проявлений вихрей и их характеристик на изображениях оптического и ИК-диапазона проводилась аналогично регистрации вихрей на РЛИ. Всего было подобрано 17 совместных спутниковых сцен, когда отмечались вихревые структуры в малооблачную погоду, при этом разница во времени между РЛИ, оптическим и ИК изображениями была не более нескольких часов.

Для анализа климатических условий в Ладожском озере за последние десятилетия привлекались результаты расчетов гидротермодинамической модели [13]. Результаты включали в себя среднесуточные значения температуры и концентрации ледяного покрова за период 1980–2020 гг. На их основе были получены среднемноголетние сезонные профили температуры для Ладожского озера в диапазоне глубин 0–100 м и оценки площади ледяного покрова за каждый месяц. Для анализа ветровых условий за рассматриваемый период и получения климатологии использовались данные реанализа ERA5¹ с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^{\circ}$.

3. Результаты

3.1. Общая характеристика

В результате обработки РЛИ с января по декабрь 2016—2022 гг. было зарегистрировано 867 поверхностных проявлений малых вихревых структур. Из них 698 были с циклоническим типом вращения и 169 с антициклоническим. Детектировались преимущественно отдельные вихри, реже грибовидные структуры или вихревые дорожки.

Малые вихри встречались на всей акватории озера (рис. 2, *a*), но чаще всего севернее острова Валаам в области с хорошо выраженными перепадами глубин. При этом в целом в озере в прибрежных мелководных районах с глубинами до 20 м было зарегистрировано 166 проявлений вихрей, на акваториях с большими глубинами 20–50 м — 211 и 50–100 м — 316, а над глубоководной частью (глубины более 100 м) — 174. Соответственно более 60 % вихрей обнаруживаются в области развития интенсивного водообмена между литоральной зоной и глубоководной частью озера.

Диаметры зарегистрированных вихрей варьировались от 0,2 до 13,5 км, при среднем значении 2,1 км как для антициклонических, так и циклонических структур. Чаще всего (около 70 % случаев) регистрировались структуры диаметром от 200 метров до 2 км (рис. 2, *б*). Крупные вихри (более 5 км) преимущественно отмечались в восточной части озера в областях, близких районам впадения рек Олонка, Свирь, Сясь, Волхов. Во всех рассматриваемых интервалах изменчивости количество циклонических вихрей в 4–6 раз превышало число антициклонических. Около 93 % проявлений имели диаметр до 5 км (граница верхней оценки бароклинного радиуса Россби для Ладожского озера), что говорит об их принадлежности к субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрофизических полей.

¹ https://cds.climate.copernicus.eu (дата обращения: 15.09.2023)

Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1... Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January...



Рис. 2. Пространственное распределение центров вихрей (*a*) на карте глубин и гистограмма их диаметров (*б*) за 2016–2022 г. Темный цвет — Сп, светлый — Ас

Fig. 2. Spatial distribution of eddy centers (*a*) on the depth map and a histogram of their diameters (*b*) for 2016–2022. Dark color - Cn, light - Ac

3.2. Межгодовая изменчивость

Статистические параметры характеристик зарегистрированных проявлений субмезомасштабных структур по годам представлены в табл. 1. В 2016 г. наблюдались только одиночные вихри, большая часть из которых была в северной части озера. В 2017—2021 г. при более высокой обеспеченности снимками вихри детектировались по всей акватории. Однако в центральной части в 2018 и 2020 гг. регистрировались только отдельные вихри, а в 2021 г. структуры были сосредоточены преимущественно в центральной и северной частях озера. В 2022 вихри отмечались в основном в центральной части озера и к северу от о-ва Валаам.

Независимо от года количество проявлений вихрей циклонического вращения всегда преобладало над количеством антициклонических структур. В среднем за рассматриваемый период циклоны встречались примерно в 4 раза чаще. Изменчивость в оценках средних диаметров субмезомасштабных вихрей за год для периода хорошо обеспеченного РЛИ (2017–2021 гг.) не превышала 900 м. Устойчивого различия в средних диаметрах циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихрей в межгодовом интервале не прослеживалось.

Таблица 1 Table 1

Статистические параметры характеристик субмезомасштабных вихрей по годам

Statistical	parameters	of	submesoscale	eddv	characteristics by years
NO COLCADO CA COMA		~ .			

Год	Количеств	о вихревых ст	руктур, шт.		Диаметр, к	И	
	Cn	Ac	Bce	Cn	Ac	Bce	количество РЛИ
2016	20	10	30	2,0	1,2	1,7	278
2017	152	40	192	2,1	2,7	2,2	596
2018	91	19	110	2,5	1,8	2,4	618
2019	118	33	151	2,0	2,3	2,1	592
2020	103	21	124	2,5	2,7	2,6	576
2021	144	34	178	1,7	1,4	1,7	589
2022	70	12	82	1,4	1,4	1,4	303
Итого	698	169	867	2,1	2,1	2,1	3552

3.3. Внутригодовая (сезонная) изменчивость

Особенности сезонной изменчивости распределения проявлений вихрей на акватории и фоновой термической стратификации вод представлены на рис. 3. Статистические оценки характеристик вихревых структур даны в табл. 2. Стоит сразу отметить, что для всех рассматриваемых сезонов статистическая обеспеченность РЛИ достаточно высока и не опускается ниже 820 изображений за сезон.

В зимний сезон (рис. 3, a, d), когда наблюдается обратная стратификация по температуре и большая часть акватории, как правило, покрывается льдом, отмечаются только отдельные вихри, регистрируемые около батиметрических неровностей дна. При этом максимальное количество вихрей фиксируется в прибрежной мелководной зоне.

В весенний сезон (рис. 3, δ , ∂), когда после вскрытия ото льда (апрель-май) воды озера начинают интенсивно прогреваться у поверхности, число вихрей возрастает на порядок по сравнению с зимним периодом, отмечаются группы вихрей и вихревые дорожки. Максимальное количество вихрей отмечается в переходной зоне между мелководными и глубоководными районами. При этом в среднем весной отмечаются вихри меньшего размера, чем в другие сезоны, что может быть связано в основном с их формированием в достаточно узкой области термического бара [9, 21]. Еще одной особенностью весеннего сезона является почти семикратное превышение частоты регистрации циклонических структур по сравнению с антициклоническими.

Летом, когда на всей акватории озера после прохождения термического бара формируется прямая стратификация по температуре (рис. 3, *в*, *е*), вихри встречались чаще чем во все другие сезоны вместе взятые. Повышение вихревой активности происходит на пике сезонного прогрева верхнего слоя в условиях формирования приповерхностного пикноклина на всей акватории Ладожского озера. При этом субмезомасштабные структуры имеют максимально разнообразные проявления и регистрируются на всей акватории озера, но регулярнее всего к северу от о-ва Валаам. Максимальное число проявлений структур отмечается над глубинами 50–100 м. По сравнению с другими сезонами летом увеличиваются и средние диаметры регистрируемых вихревых структур.

В осенний сезон в период выхолаживания термическая стратификация ослабевает (рис. 3, *e*, *e*), число вихрей сокращается примерно в два раза по сравнению с летним сезоном. Но они по-прежнему встречаются на всей акватории от прибрежных районов до глубоководной части, и максимальная их повторяемость приходится на тот же интервал глубин, что и летом. Как и весной, увеличивается частота встречаемости циклонических структур по сравнению с антициклоническими.

В каждый отдельный сезон (табл. 2) циклонические структуры встречались чаще антициклонических. Значительное преобладание циклонических структур наиболее было выражено весной и осенью. В летний сезон с развитием стратификации чаще отмечались более крупные вихри как среди циклонов, так и среди антициклонов. При этом четкой особенности, характерной для разных морей [19, 22], когда средний диаметр антициклонов больше — не прослеживалось.

За исключением зимнего сезона максимальное количество рассматриваемых проявлений прослеживалось над глубинами 50—100 м, поэтому можно полагать, что субмезомасштабные вихри играют важную роль в обмене между мелководными и глубоководными областями озера.

Для прояснения причин столь значительной сезонной изменчивости количества поверхностных проявлений вихрей были детализированы данные о встречаемости вихревых структур, привлечены данные по приводному ветру и площади ледового покрова, т. к. они являются важнейшими параметрами, влияющим на проявления вихревых процессов на РЛИ (см. табл. 3).

Количество зарегистрированных вихревых структур в разы меняется по месяцам. Выделяется два выраженных периода: с мая по сентябрь, когда в месяц отмечается значительное число проявлений (> 100 шт. в месяц), и с ноября по март, когда вихри на акватории Ладожского озера регистрируются эпизодически (< 10 шт. в месяц). Апрель и октябрь являются переходными месяцами между данными периодами. Период значительного количества вихрей практически совпадает очищением акватории ото льда и с весенне-летним ослаблением ветров. Кроме того, для этого периода характерно присутствие прямой термической стратификации на большей части акватории озера. Соответственно субмезомасштабные вихри лучше развиваются в тонком приповерхностном пикноклине, наблюдаемом в Ладожском озере с мая по октябрь. Максимальное количество вихревых структур регистрируется в июле при самых слабых ветрах. Вероятно, в качестве основных механизмов ответственных за генерацию вихрей в условиях ослабления пространственно-неоднородного ветрового воздействия выступают: топографические эффекты при обтекании неровностей дна, берегов и островов; а также бароклинная и баротропная неустойчивость в области фронтальных зон различного происхождения. Таким образом субмезомасштабные вихри играют важную роль в обмене между различающимися по стратификации и глубине областями озера в условиях слабых ветров.

Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1... Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January...



Рис. 3. Распределение положений центров (черные точки — циклоны, белые — антициклоны) вихревых структур по сезонам (*a* — декабрь-февраль, *б* — март-май, *в* — июнь-август, *e* — сентябрь-ноябрь) и профили температуры по климатическим данным, осредненным для всей акватории Ладожского озера от 0 до 100 м, за зимний период — синий цвет и за весенний — зеленый (*d*), за летний — красный и за осенний — желтый (*e*)

Fig. 3. Distribution of the positions of the centers (black dots – cyclones, white – anticyclones) of eddy structures by season (a – December-February, b – March-May, c – June-August, d – September-November) and temperature profiles according to climate data averaged for the entire water area of Lake Ladoga from 0 to 100 m, for the winter period – blue and for the spring – green (e), for the summer – red and for the autumn – yellow (f)

Таблица 2 Table 2

Статистические параметры характеристик субмезомасштабных вихрей по сезонам

Statistical parameters of submesoscale eddy characteristics by seasons

Сезон		Количество вихре- вых структур, шт	Диаметр, км	Количество вихревых структур по глубинам		
	Количество РЛИ, ШТ -	Bcero (Cn/Ac)	Средний для всех (Cn/Ac)	0-20/20-50/		
			1	50—100/100—250 м		
Зима (декабрь-февраль)	938	23 (15/8)	1,6 (1,9/1,1)	8 / 9 /1 /5		
Весна (март-май)	896	153 (134/19)	1,5 (1,4/1,8)	21 / 34 / 78 /20		
Лето (июнь-август)	821	467 (362/105)	2,4 (2,4/2,2)	106 / 119 / 142 /100		
Осень (сентябрь-ноябрь)	897	224 (187/37)	1,9 (1,9/2,0)	31 / 49/ 95 / 49		

Таблица З

Table 3

Количество зарегистрированных вихревых структур и климатические характеристик скорости ветра, площади ледяного покрова по месяцам

Number of registered eddy structures and climatic characteristics of wind speed, ice cover area by month

Параметр/месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Количество вихревых структур, шт.	6	9	6	24	123	140	187	140	152	65	7	8
Средняя скорость ветра, м/с	4,8	4,5	4,3	3,9	3,8	3,7	3,5	3,9	4,5	4.9	5,2	5,3
Площадь ледяного покрова, км ²	10125	15133	14830	8000	188	_			0,6	211	2757	

В качестве конкретного примера обмена водами за счет вихревых структур между разделенными термическим фронтом областями водоема приведем подборку карт за 7 августа 2019 г. (рис. 4).



Рис. 4. Пространственное распределение поля температуры поверхности моря Suomi NPP VIIRS07.08.2019 (09:42 UTC) в северо-восточной части Ладожского озера (*a*), черным прямоугольником показано положение фрагментов спутниковых данных за ту же дату: изображения в видимом диапазоне Sentinel-2 (09:20 UTC) (*б*), радиолокационного изображения Sentinel-1 (15:24 UTC) (*в*). Кругами обозначены места проявлений вихрей, стрелочками — соответствие вихрей на разных изображениях

Fig. 4. Spatial distribution of the Suomi NPP VIIRS sea surface temperature field on 07.08.2019 (09:42 UTC) in the northeastern part of Lake Ladoga (*a*), the black rectangle shows the position of satellite data fragments for the same date: Sentinel-2 image (09:20 UTC) (*b*), Sentinel-1 radar image (15:24 UTC) (*c*). Circles indicate the locations of eddy manifestations, arrows indicate the correspondence of eddies in different images

Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1... Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January...

Под влиянием воздействия в предыдущие два дня северо-западных ветров со средней скоростью 4 м/с на акватории озера сформировалась локальная фронтальная зона, разделяющая теплые воды на юге и холодные на севере, при этом акцентируем внимание на области, покрытой данными всех спутниковых сенсоров и выделенной черным прямоугольником на рис. 4, *a*. Отметим, что рассматриваемая область повышенных термических градиентов сформировалась над глубинами около 50 м. В этот день в условиях маловетреной погоды со стороны холодной части высокоградиентной температурной зоны на относительно небольшом участке были зарегистрированы три циклонические вихревые структуры. Они имели диаметр от 3,5 до 5,5 км и двигались (судя по смещению положений вихрей на оптическом и радиолокационном снимках) в направлении к центру озера из области фронтальной зоны. Отметим, что в связи с малыми размерами вихрей регистрировать их в поле поверхностной температуры по спутниковым данным представилось затруднительным.

Схожие картины существования проявлений групп малых вихрей на РЛИ вблизи высоко градиентных зон, отмечаемых в поле температуры поверхности, наблюдались в 9 из рассмотренных 17 случаев для которых были подобраны композитные сцены. Это позволяет полгать, что генерация субмезомасштабных структур в области фронтальных зон за счет бароклинных эффектов может быть весьма распространённым явлением, учет которого необходим при высокоразрешающем моделировании биогеохимических циклов Ладожского озера.

4. Заключение

В работе на основе анализа архива радиолокационных изображений высокого разрешения за 2016– 2022 гг. была оценена многолетняя и сезонная изменчивость характеристик поверхностных проявлений малых вихрей на акватории Ладожского озера. Всего было зарегистрировано более 876 проявлений вихревых структур со средним диаметром около 2 км, что близко к климатическим оценкам бароклинного радиуса Россби для рассматриваемого региона. Они как правило встречаются в виде одиночных вихрей, реже в виде групп. Циклоны встречались примерно в 4 раза чаще антициклонов, но средние оценки их диаметров одинаковы.

Выполненное обобщение показало, что субмезомасштабные структуры являются распространенным явлением на всей акватории озера. Во все годы вихри чаще всего отмечались к северу от о-ва Валаам. Значительной межгодовой изменчивости в их характеристиках не прослеживалось, они были близки к средним многолетним. В то же время наблюдается выраженный внутригодовой (сезонный) ход характеристик субмезомасштабных структур, как в частоте и местах встречаемости, так и, в меньшей степени, в их размерах. Установлено, что на акватории озера малые вихри (более чем в 60 % случаев) регистрировались в период развития прямой термической стратификации и присутствия приповерхностного пикноклина. При этом они наиболее часто наблюдались в области глубинами 50–100 м, вблизи областей фронтальных зон различного генезиса. В зимний период из-за наличия ледового покрова количество регистрируемых вихрей снижалось на порядок.

В нашем исследовании подтверждены результаты [9, 21], что неустойчивость в области фронтальных зон в Ладожском озере может быть одной из доминирующих причин появления групп малых вихрей в условиях, когда топографические эффекты и влияние ветра не должны быть существенными. Можно полагать, что под их влиянием может формироваться значимый горизонтальный перенос тепла из прибрежной теплоактивной зоны к области термобара о недооценке которого упоминалось в [23]. Такой процесс может приводить так же к эффективному переносу вод через термобар (фронт) и, соответственно, значимо влиять на особенности вертикального и горизонтального распределения биохимических параметров на локальных акваториях.

Представленные результаты работы могут стать основой для валидации высокоразрешающих гидродинамических моделей Ладожского озера в части субмезомасштабной вихревой динамики, создаваемых для проведения прогностических оценок будущего состояния озера.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

Funding

This work was supported by Russian Science Foundation (project no. 23-17-20010) and St. Petersburg Science Foundation (project no. 23-17-20010).

Литература

- 1. *Филатов Н.Н.* Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 3–14. doi:10.7868/S2073667319010015
- 2. *Hutter K., Wang Y., Chubarenko I.* Physics of Lakes. Volume 2: Lakes as Oscillators. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. 646 p. doi:10.1007/978-3-642-19112-1
- 3. *Hamze-Ziabari S.M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D.A.* Monitoring Mesoscale to Submesoscale Processes in Large Lakes with Sentinel-1 SAR Imagery: The Case of Lake Geneva // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. 4967. doi:10.3390/rs14194967
- 4. *Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. Geophysical Monograph Series 2008. Vol. 177. P. 17–38. doi:10.1029/177GM04
- Lévy M., Ferrari R., Franks P.J.S., Martin A.P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39, L14602. doi:10.1029/2012GL052756
- 6. *McKinney P., Holt B., Matsumoto K.* Small eddies observed in Lake Superior using SAR and sea surface temperature data // Journal of Great Lakes Research. 2012. Vol. 38. P. 786–797. doi:10.1016/j.jglr.2012.09.023
- Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Kostianaia E.A., Sirota A.M. Satellite remote sensing of Lake Skadar/ Shkodra // Shkodra Lake Environment, Part of the The Handbook of Environmental Chemistry, 2018. Vol. 80. P. 89– 120. doi:10.1007/698_2018_308
- 8. *Кондратьев К.Я., Филатов Н.Н., Зайцев Л.В., Зубенко А.В.* Особенности динамики вод Ладожского озера по данным дистанционного зондирования // Доклады АН СССР. 1987. Т. 293, № 5. С. 1224–1227.
- 9. Зимин А.В., Атаджанова О.А., Благодатских Е.А. и др. Субмезомасштабные вихревые структуры Ладожского озера по радиолокационным данным Sentinel-1 за теплый период 2019–2022 гг. // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514, № 2. С. 350–355. doi:10.31857/S2686739724020201
- Zimin, A.V., Blagodatskikh, E.A., Atadzhanova, O.A. Small Eddies Observed in Ladoga and Onega Lakes Using SAR Data // Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer: Cham, 2023. P. 191–197. doi:10.1007/978-3-031-47851-2_22
- Hamze-Ziabari S.M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D.A. Monitoring mesoscale to submesoscale processes in large lakes with Sentinel-1 SAR imagery: The case of Lake Geneva // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 19. 4967. doi:10.3390/rs14194967
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Lavrova O. Yu. Water Dynamics and Morphometric Parameters of Lake Sevan (Armenia) in the Summer–Autumn Period According to Satellite Data // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. 2285. doi:10.3390/rs16132285
- 13. Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5
- 14. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 200 с.
- Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glok N.I., Wekerle C. (2020). Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data // Journal of Geophysical Research: Oceans.2020. Vol. 125. e2019JC015832. doi:10.1029/2019JC015832
- Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. 134. doi:10.3390/rs14010134
- 17. Lee J.-S. Digital image smoothing and the sigma filter // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1984. Vol. 24, N 2. P. 255–269. doi:10.1016/0734-189x(83)90047-6
- Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. Spirals on the sea // Proceedings of the Royal Society of London A. 2000. Vol. 456. P. 1217–1280. doi:10.1098/rspa.2000.0560
- Karimova S.S., Gade M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 37, N 10. P. 2394–2414. doi:10.1080/01431161.2016.1145367
- 20. *Stuhlmacher A., Gade M.* Statistical Analyses of Eddies in the Western Mediterranean Sea based on Synthetic Aperture Radar Imagery // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 250. 112023. doi:10.1016/j.rse.2020.112023
- 21. *Kondratyev K. Ya., Filatov N.N., Melentev V.V.* et al. Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach. London: Springer Science & Business Media, 1999. 406 p.
- 22. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 2. С. 80–90. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-80-90

Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1... Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January...

23. *Malm J., Grahn L, Mironov D., Terzhevik A.* Field Investigation of the Thermal Bar in Lake Ladoga, Spring 1991 // Hydrology Research. 1993. Vol. 24, N 5. P. 339–358. doi:10.2166/nh.1993.12

References

- 1. Filatov N.N. The modern state and perspective investigations of hydrophysical processes and ecosystems of inland waters (a review). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019;12(1):3–14. doi:10.7868/S2073667319010015 (In Russian)
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes. Volume 2: *Lakes as Oscillators*. Heidelberg: Springer Berlin: 2011. 646 p. doi:10.1007/978-3-642-19112-1
- Hamze-Ziabari S.M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D.A. Monitoring Mesoscale to Submesoscale Processes in Large Lakes with Sentinel-1 SAR Imagery: The Case of Lake Geneva. *Remote Sensing*. 2022;14:4967. doi:10.3390/rs14194967
- Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics. Ocean Modeling in an Eddying Regime / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. *Geophysical Monograph Series*. 2008;177:17–38. doi:10.1029/177GM04
- Lévy M., Ferrari R., Franks P.J.S., Martin A.P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale. *Geophysical Research Letters*. 2012;39: L14602. doi:10.1029/2012GL052756
- McKinney P., Holt B., Matsumoto K. Small eddies observed in Lake Superior using SAR and sea surface temperature data. Journal of Great Lakes Research. 2012, 38, 786–797. doi:10.1016/j.jglr.2012.09.023
- Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Kostianaia E.A., Sirota A.M. Satellite remote sensing of Lake Skadar/Shkodra. Shkodra Lake Environment, Part of the The Handbook of Environmental Chemistry. 2018;80:89–120. doi:10.1007/698_2018_308
- 8. Kondratyev K. Ya., Filatov N.N., Zaitsev L.V., Zubenko A.V. Features of the dynamics of the waters of Lake Ladoga according to remote sensing data. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1987;293(5):1224–1227 (In Russian).
- Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Blagodatskikh E.A. et al. Submesoscale Eddy Structures of Lake Ladoga According to Sentinel-1 Radar Data for a Warm Period of 2019–2022. *Dokly Earth Sciences*. 2024;514:296–300. doi:10.1134/S1028334X23602742
- Zimin A.V., Blagodatskikh E.A., Atadzhanova O.A. Small eddies observed in Ladoga and Onega Lakes using SAR data. Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer: Cham; 2023, 191–197. doi:10.1007/978-3-031-47851-2_22
- Hamze-Ziabari S.M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D.A. Monitoring mesoscale to submesoscale processes in large lakes with Sentinel-1 SAR imagery: The case of Lake Geneva. *Remote Sensing*. 2022;14(19):4967. doi:10.3390/rs14194967
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Lavrova O. Yu. Water Dynamics and Morphometric Parameters of Lake Sevan (Armenia) in the Summer–Autumn Period According to Satellite Data. *Remote Sensing*. 2024;16:2285. doi:10.3390/rs16132285
- 13. Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Konik A.A. Reproduction of the Current Climatic State of the Lake Ladoga Ecosystem. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(2):50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5
- 14. Filatov N.N. Hydrodynamics of Lakes. St. Petersburg: Nauka; 1991. 200 p. (In Russian).
- Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glok N.I., Wekerle C. Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2020;125: e2019JC015832. doi:10.1029/2019JC015832
- Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the marginal ice zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR observations in winter. *Remote Sensing*. 2022;14:134. doi:10.3390/rs14010134
- Lee J.-S. Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1984;24(2):255–269. doi:10.1016/0734-189x(83)90047-6
- Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen, F. Spirals on the sea. Proceedings of the Royal Society of London A. 2000;456:1217–1280. doi:10.1098/rspa.2000.0560
- 19. Karimova S.S., Gade M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2016;37(10):2394–2414. doi:10.1080/01431161.2016.1145367
- Stuhlmacher A., Gade M. Statistical Analyses of Eddies in the Western Mediterranean Sea based on Synthetic Aperture Radar Imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2020;250:112023. doi:10.1016/j.rse.2020.112023
- 21. Kondratyev K. Ya., Filatov N.N., Melentev V.V. et al. *Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach*. London: Springer Science & Business Media; 1999. 406 p.
- Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Romanenkov D.A., Kozlov I.E. Satellite Radar Observations of Small Eddies in the White, Barents and Kara Seas. *Physical Oceanography*. 2017;2:75–83. doi:10.22449/1573-160X-2017-2-75-83
- Malm J., Grahn L., Mironov D., Terzhevik A. Field Investigation of the Thermal Bar in Lake Ladoga, Spring 1991. *Hydrology Research*. 1993;24(4):339–358. doi:10.2166/nh.1993.12

Об авторах

- ЗИМИН Алексей Вадимович, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор географических наук, ORCID: 0000-0003-1662-6385, Scopus AuthorID: 55032301400, WoS ResearcherID: C-5885-2014, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: zimin2@mail.ru
- АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5016-2970, ORCID: 0000-0001-6820-0533, Scopus AuthorID: 57188718743, WoS ResearcherID: R-7835-2018, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: oksanam07@list.ru
- КОНИК Александр Александрович, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5839-1738, ORCID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, WoS ResearcherID: AAB-7195–2020, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: konikrshu@gmail.com
- ИСАЕВ Алексей Владимирович, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0003-2005-4949, WoS ResearcherID: C-1370-2014, Scopus AuthorID: 25641182000, SPIN-код (РИНЦ): 4059-6017, e-mail: isaev1975@gmail.com

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-4

УДК 532.5.032

© Р. Ю. Монахов^{*1}, А. А. Родионов¹, И. Е. Капранов², Н. Н. Шпилев¹, М. С. Яковчук³, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва

²АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»», 197760, ул. Макаровская, д. 2, литера Л,

вн. тер. г. Кронштадт, г. Санкт-Петербург

³БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, ул. 1-я Красноармейская, д.1, г. Санкт-Петербург *monakhov-62@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В КРУПНОМАСШТАБНОМ ГИДРОФИЗИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

Статья поступила в редакцию 22.10.2024, после доработки 12.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

Статья посвящена исследованиям процесса генерации и эволюции вихревых колец, формирующихся в водной среде при выбросе струи воды в затопленный объем. Представлены расчётные данные по известным из литературы соотношениям, а также результаты моделирования по вновь созданной методике. Обоснованы характеристики генератора вихревых колец в составе моделирующего стенда, созданного на базе крупномасштабного гидрофизического бассейна. Экспериментальные исследования проводились в условиях температурной стратификации среды и с разницей температур воды струи и бассейна. Результаты экспериментов по формированию и движению вихревых колец удовлетворительно соответствуют расчетным данным. При этом влияние сформированной в бассейне стратификации на характеристики вихревых колец оказалось незначительным. Выявлено существенное влияние безразмерной длины струи на основные характеристики вихревых колец и разницы между температурой воды на горизонте их формирования и температурой струи на траекторию движения колец.

Ключевые слова: вихревые кольца, вихревая динамика, струи, физический эксперимент

UDC 532.5.032

© R. Yu. Monakhov^{1*}, A. A. Rodionov¹, I. Ye. Kapranov², N. N. Shpilev¹, M. S. Yakovchuk³, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia ²JSC Engineering Center "Kronstadt", 2, liter. L, Makarovskaya Str., in. ter. city of Kronstadt, St. Petersburg, 197760, Russia

³Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, 1 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russia

*monakhov-62@mail.ru

NUMERICAL AND PHYSICAL MODELING OF GENERATION AND EVOLUTION OF VORTEX RINGS IN A LARGE-SCALE HYDROPHYSICAL WATER TANK

Received 22.10.2024, Revised 12.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

The article focuses on the study of vortex ring generation and evolution in aquatic environments resulting from the discharge of a water jet into a flooded volume. It presents computational data based on well-known relationships from the literature, as well as results from simulations using a newly developed methodology. The characteristics of the vortex ring generator within the experimental setup, created using a large-scale hydrophysical water tank, are justified. Experimental studies were conducted under conditions of thermal stratification of the medium, with a temperature difference between the water jet and the tank. The experimental results on vortex ring formation and motion show good agreement with the computational data. The influence of the thermal stratification in the water tank on the vortex ring characteristics was found to be negligible. A significant effect of the dimensionless jet length on the key characteristics of the vortex rings was observed, along with the temperature differences between the water layer at the formation horizon and the jet, impacting the rings' trajectory.

Keywords: vortex rings, vortex dynamics, jets, physical experiment

Ссылка для цитирования: *Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Капранов И.Е., Шпилев Н.Н., Яковчук М.С.* Численное и физическое моделирование генерации и эволюции вихревых колец в крупномасштабном гидрофизическом бассейне // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 55–70. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-4

For citation: Monakhov R. Yu., Rodionov A.A., Kapranov I.Ye., Shpilev N.N., Yakovchuk M.S. Numerical and Physical Modeling of Generation and Evolution of Vortex Rings in a Large-Scale Hydrophysical Water Tank. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):55–70. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-4

1. Введение

Вихревые кольца, распространяющиеся в воде или атмосфере, представляют собой интересный физический феномен [1–3]. Будучи сформированными с помощью специального устройства (генератора), вихревые кольца слабо взаимодействуют с окружающей средой, существуют в течении достаточно продолжительного времени, и, перемещаясь в пространстве, в целом сохраняют свою форму и размеры. Деградация колец, в основном, обусловливается вязкой диссипацией, взаимодействием с твердыми преградами или границей раздела сред. Вихревые кольца [4–14] и смежные вопросы [15–22] неоднократно являлись предметом исследования и обсуждения. Для практического использования вихревые кольца и вихри исследовались [5, 15, 23–26], например, в интересах повышения эффективности подачи газообразного и жидкого огнегасителя в область горения при пожарах.

В настоящей работе численно и экспериментально исследуются процессы генерации и эволюции вихревых колец (ВК), формируемых при выбросе струи воды в затопленный объем через круглое отверстие заданного радиуса. Особенностью настоящего исследования является то, что эксперименты проводились в крупномасштабном гидрофизическом бассейне (облицовка из нержавеющей стали, длина 6 м, ширина 2 м, глубина 2 м, бассейн оборудован тремя группами теплообменников, позволяющих сформировать заданное распределение температуры воды по глубине) в условиях выраженной стратификации при вертикальном температурном градиенте более 10 °С/м.

2. Основные расчетные соотношения и результаты численного моделирования

По данным работ [4, 5, 6, 7, 23–26] практически все основные характеристики вихревого кольца, такие как его радиус, циркуляция, импульс и скорость зависят от трех параметров, связанных с генерацией ВК. Это продолжительность генерирующего импульса T(c), характерная скорость истечения струи из отверстия генерации V_0 (м/с) и радиус отверстия генерации R_0 (м). Данные параметры могут быть объединены в безразмерный комплекс, который называется безразмерная длина струи $\overline{L} = \frac{V_0 \cdot T}{R_0}$, выбрасываемой из круглого сопла в затопленный объем [23–26]. При расчете параметров вихревых колец также используется число Рейнольдса $\operatorname{Re} = \frac{V_0 \cdot R_0}{v}$, построенное по радиусу отверстия R_0 (v — коэффициент кинематической вязкости воды, m^2/c).

В соответствии с [23, 24] характеристики вихревых колец рассчитываются по формулам: безразмерная длина λ̄ пути формирования кольца,

$$\overline{\lambda} = a \cdot \ln \left[ch \left(c \cdot \overline{L} \right) \right],\tag{1}$$

где *a* = 2,424 и с = 0,1695.

безразмерный \overline{R} и размерный R(M) радиус кольца

$$\overline{R} = 1,0+0,125 \cdot \overline{L} - 0,25 \cdot \overline{\lambda}; R = \overline{R} \cdot R_0, \qquad (2)$$

безразмерная $\overline{\Gamma}$ и размерная Γ (м²/с) циркуляция

$$\overline{\Gamma} = 0, 4 + 0, 5 \cdot \overline{L} - \overline{\lambda}; \ \Gamma = \overline{\Gamma} \cdot R_0 \cdot V_0.$$
(3)

1 /

Рассчитывается безразмерный \overline{A} и размерный A(M) радиус тора:

$$\overline{A} = \operatorname{Re}^{-\frac{l}{4}} \cdot \sqrt{\frac{(1+\beta)\cdot b}{2\cdot\pi\cdot\overline{R}}} \cdot \left(\int_{0}^{\overline{L}} \sqrt{\overline{l}+\overline{\lambda}} \, d\overline{z} - \frac{4}{3} \cdot \left[\left(\overline{l}+\overline{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} - \overline{l}^{\frac{3}{2}}\right]\right)^{\frac{l}{2}}; \qquad (4)$$
$$A = \overline{A} \cdot R_{0}; \ \overline{l} = \frac{l}{R_{0}},$$

где l — длина пути жидкости в сопле, м (в расчете и эксперименте 0,005 м); $\beta = 3,234$; b = 5,22 $z = V_0 \cdot t$; $t \in [0;T]$; $\overline{z} = \frac{z}{R_0}$. Скорость перемещения вихревого кольца:

$$u_0 = \frac{\Psi \cdot \Gamma}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot R}{A} \right) - \frac{1}{4} \right], \tag{5}$$

где $\psi \approx 0,75$ — безразмерный коэффициент, определяемый из опыта [24].

Факультативно определяется также безразмерный \overline{W} и размерный $W(\kappa r \times m/c)$ импульс вихревого кольца, его безразмерная \overline{E} и размерная $E(\mbox{Д} m)$ энергия [24]:

$$\overline{W} = \overline{L} - 0,85 \cdot \overline{\lambda}; \quad W = \overline{W} \cdot \pi \cdot \rho \cdot R_0^3 \cdot V_0;$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \overline{R} \cdot \overline{\Gamma}^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot R}{A} \right) - \frac{7}{4} \right]; \quad E = \overline{E} \cdot \pi \cdot \rho \cdot R_0^3 \cdot V_0^2. \quad (6)$$

Приведенные выше зависимости не отвечают на вопрос об изменении параметров вихревых колец во времени (по пути движения) за счет вязкой диссипации. Кроме того, не ясен критерий определения радиуса тора. Поэтому ниже рассматривается численная модель, учитывающая потери на вязкую диссипацию и позволяющая построить траектории частиц жидкости.

По длине пути жидкости в сопле *l* (или по толщине передней стенки генератора, рассмотренного ниже) может быть построено число Рейнольдса $\text{Re}^{(l)} = \frac{V_0 \cdot l}{v}$, которое для условий эксперимента близко к 10³, что позволяет предполагать отсутствие высокочастотных турбулентных флуктуаций при торможении потока в сопле.

В рамках построения расчетной методики для координаты *у* от края отверстия к центру (рис. 11) в направлении нормальном к потоку рассматривается элементарный объем жидкости, представляющий собой тонкостенный цилиндр с длиной *S* (равной размерной длине струи), радиусом $R_0 - y$ и малой толщиной δ . Далее интервал [0, R_0] разбивался на 500 отрезков шириной δ . На элементарный объем в момент времени *t* действует вязкое усилие

$$F(y,t) = \mu \cdot \frac{\left[u\left(y + \frac{\delta}{2}, t\right) - u\left(y - \frac{\delta}{2}, t\right)\right]}{\delta} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(R_0 - y\right) \cdot S;$$
(7)

Для скорости каждого пространственного слоя записываются обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\frac{du(y,t)}{dt} = \frac{F(y,t)}{m(y)} = v \cdot \frac{\left[u\left(y + \frac{\delta}{2}, t\right) - u\left(y - \frac{\delta}{2}, t\right)\right]}{\delta^2}$$
(8)

с начальным условием u(y, 0), которое определяется скоростным профилем, построенным для нулевого значения продольной координаты x (наружный край отверстия).

Выше

$$m(y) = \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_0 - y) \cdot \delta \cdot S$$

 ρ — плотность воды, кг/м³; μ — коэффициент динамической вязкости, Па × с; ν — коэффициент динамической вязкости, м²/с.

При этом не входящая в (8) величина R_0 совместно с начальной скоростью струи учитывается при задании начального профиля скорости по поперечной координате у (u(y, 0)), а величина S, опять же совместно с начальной скоростью струи определяет время интегрирования (8).

По разработанной методике рассчитывались завихрённость течения (как величина ротора скорости с точ-

ностью до знака) $\zeta(y,t) = \frac{du(y,t)}{dy}$, угловая скорость потока $\omega(y,t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{du(y,t)}{dy}$ и угол поворота потока

$$\Psi(y,t) = \int_0^{\infty} \omega(y,\tau) d\tau.$$

В двумерном приближении начало координат выбирается произвольная точка на краю отверстия. Ось *y* направлена к центру отверстия в плоскости стенки. Ось *x* нормальна к плоскости стенки. Если ввести ось *z*, образующую с упомянутыми осями правую тройку, то вектор ротор скорости будет направлен вдоль этой du(y,t) = dv(y,t)

оси, а его величина составит $\frac{du(y,t)}{dy} - \frac{dv(y,t)}{dx}$. Предполагается и допускается, что вблизи отверстия производная скорости потока в поперечном направлении значительно превосходит по величине производную в продольном направлении.

Проекции скорости на координатные направления *x* (вдоль потока по оси генератора) и *y* и координаты частиц *X* и *Y* определяются из соотношений

Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Капранов И.Е., Шпилев Н.Н., Яковчук М.С. Monakhov R.Yu., Rodionov A.A., Kapranov I.Ye., Shpilev N.N., Yakovchuk M.S.

$$u_{x}(y,t) = u(y,t) \cdot \cos\left[\psi(y,t)\right]; \quad u_{y}(y,t) = u(y,t) \cdot \sin\left[\psi(y,t)\right]; \tag{9}$$
$$X(y,t) = \int_{0}^{t} u_{x}(y,\tau) d\tau; \quad Y(y,t) = \int_{0}^{t} u_{y}(y,\tau) d\tau.$$

Траектории частиц, в зависимости от указанной на графиках координаты \overline{y} , отнесенной к радиусу отверстия, представлены на рис. 1.

Графики показывают, что чем ближе частицы потока к стенке генератора, тем более закручена траектория их движения.

На рис. 2 для двух последовательных моментов времени (1 с — красный цвет и 2,5 с — синий цвет) приведены зависимости проекции скорости на поперечное направление от безразмерной координаты \bar{y} . Очевидно, что координатам перехода осциллирующих участков графиков к монотонным (точки «**A**» и «**C**») соответствуют радиусы торов, а координатам, где достигаются максимальные скорости в поперечном направлении — радиусам вихревого кольца (без учета радиуса отверстия, точки «**B**» и «**D**»). Графики иллюстрируют наблюдаемую в опыте эволюцию вихревых колец.



Рис. 1. Траектории частиц в зависимости от безразмерного расстояния \overline{y} от края отверстия к центру, обозначенного цифрами на графике

Fig. 1. Particle trajectories as a function of the dimensionless distance \overline{y} from the edge of the hole to the center, indicated by the numbers on the graph



Рис. 2. Зависимости проекции скорости на поперечное направление от безразмерной координаты \overline{y} **Fig. 2**. Dependences of the velocity projection on the transverse direction on the dimensionless coordinate \overline{y}

Для размерных длин струи 0,05, 0,1, 0,5 и 1 м (что соответствует, для $R_0 = 75$ мм, безразмерным длинам струи 1,33, 2,67, 13,3 и 26,7) построены зависимости безразмерного радиуса тора $\left(\overline{A} = \frac{A}{R_0}\right)$ и безразмерно-

го радиуса кольца $\left(\overline{R} = \frac{R}{R_0}\right)$ от времени, приведенные на рис. 3 и 4 соответственно. Цифрами обозначены размерные длины струй.

Следует отметить, что для больших длин струй насыщения во времени не происходит, и безразмерный радиус тора становится близким к 1/2 (отмеченная эллипсом на рис. 3 область) — вихревое кольцо разрушается.



Рис. 3. Зависимости безразмерного радиуса тора от времени

Fig. 3. Dependence of the dimensionless torus radius on time



Puc. 4. Зависимости безразмерного радиуса вихревого кольца от времениFig. 4. Dependence of the dimensionless vortex ring radius on time

Напротив, через 2–3 секунды вне зависимости от длины струи для радиуса ВК происходит насыщение — радиус кольца практически не изменяется до его распада.

Графики зависимостей безразмерной завихренности от времени (для размерной длины струи 0,1 м) приведены на рис. 5. Цифрами обозначено безразмерное расстояние от края отверстия к оси струи. Графики демонстрируют деградацию ВК, обусловленную, в основном, вязкой диссипацией.



Рис. 5. Зависимость безразмерной завихренности от времени **Fig. 5**. Dependence of the dimensionless vorticity on time

3. Конструкция генератора вихревых колец

Для генерации вихревых колец в воде будет использован генератор типа «стенка с отверстием» [4, 6], который позволяет формировать кольца с наиболее высокой интенсивностью вихревого движения, скоростью и дальностью распространения. Общий вид такого генератора представлен на рис. 6. Задача состоит в определении параметров генератора (скорость потока, время формирования струи и радиус отверстия)

и подборе конструкции, обеспечивающей надежное формирование вихревых колец.

Запуск генератора типа «стенка с отверстием» возможен тремя способами:

 – быстрым изменением запреградного объёма (А на рис. 6) генератора, например за счет перемещения поршня;

 возбуждением колебаний упругой мембраны, разделяющей запреградный объём;

 импульсным подводом некоторого объема воды под избыточным давлением в запреградное пространство.

Рис. 6. Вариант генератора вихревых колец типа «стенка с отверстием»

Fig. 6. Vortex ring generator variant of the "wall with a hole" type

В последнем случае к камере генератора лабораторного стенда присоединяется электромеханический клапан, который и должен обеспечивать импульсный массоподвод воды для обеспечения нестационарного истечения из отверстия и формирования вихревого кольца.

Время формирования струи *Т* можно определить, имея паспортное значение времени срабатывания клапана. Для выбранного варианта клапана оно составляет 0,05 с. Для цикла «открытие + закрытие», который применяется в случае генерации вихревого кольца, следует удвоенное время срабатывания, то есть 0,1 с.

Для первоначально принятого для расчета радиуса отверстия 12,7 мм (дюймовая труба) безразмерная длина струи составит примерно 300 и это значение лежит далеко за пределами диапазона, где возможна генерация устойчивых вихревых колец. В работах [23–26] эксперименты с воздушными вихревыми кольцами проводились до значений \bar{L} не превышающих 20, а в работах [8–14] указанная безразмерная длина не превышала единиц. Большая длина струи препятствует локализации области сворачивания потока в вихревое кольцо. Происходит растяжение и разрушение этой области, что делает образование вихревой структуры невозможным. Указанные обстоятельства иллюстрируются зависимостью безразмерного радиуса тора \bar{A} от безразмерной длины струи \bar{L} , представленной на рис. 7. Предельным, очевидно, является безразмерный радиус тора, равный 0,5.

Для создания генерирующей струи меньшей протяжённости необходимо модифицировать параметры генерации, входящие в выражение для \overline{L} . Снижение \overline{L} будет происходить при уменьшении времени T и скорости V_0 , а также при увеличении R_0 . Снижение T невозможно в силу технических ограничений на быстродействие клапана, а V_0 зависит от давления на входе в рабочую камеру генератора и радиуса R_0 . Очевидно, что характер зависимости V_0 от R_0 таков, что при росте R_0 скорость V_0 будет падать. Таким образом, уменьшение безразмерной длины струи \overline{L} возможно только путем увеличения радиуса R_0 относительно ранее принятого в расчете $R_0 = 12,7$ мм. Для $R_0 = 0,0375$ м безразмерная длина струи оказывается близкой к 10. На рис. 8-10 для этого случая представлены распределения модуля скорости для трех моментов времени, соответствующих этапу генерации вихревого кольца и начальной фазе его движения. Данные получены при моделировании с использованием пакета "Fluent" (с учетом [27, 28]) для макета, представленного на рис. 11. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной конфигурации. Она обеспечивает получение устойчивых вихревых колец с удовлетворительной динамикой закрутки потока и отрывом вихревой структуры с переходом в фазу движения.

Результаты расчета показывают необходимость в некоторых внутренних конструктивных элементах, которые способны обеспечить большую равномерность поля скорости и, соответственно, понизить максимальное ее значение, перед тем как поток подойдет к отверстию, обеспечивающему генерацию. Понижение скорости может быть достигнуто путем плавного увеличения поперечного сечения камеры. Однако в виду достаточно большого отношения площадей сечения клапана и отверстия генерации протяженность переходного участка плавного изменения скорости будет велика. Это существенно снижает компактность устройства и повышает гидравлические потери. Тем не менее этот способ может быть использован в сочетании с другими мерами.



Рис. 7. Зависимость безразмерного радиуса тора от безразмерной длины струи **Fig.** 7. Dependence of the dimensionless torus radius on the dimensionless jet length

Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Капранов И.Е., Шпилев Н.Н., Яковчук М.С. Monakhov R.Yu., Rodionov A.A., Kapranov I.Ye., Shpilev N.N., Yakovchuk M.S.

Другим возможным вариантом снижения скорости является использование дефлекторов или перегородок, которые уводят поток от оси к периферии, где проходное сечение имеет большую площадь. Это приводит к значительному падению скорости на участке небольшой осевой протяженности. Для решения проблемы обеспечения равномерности поля скорости в поперечном сечении генератора перед выходным отверстием был предложен вариант с сочетанием дефлекторных элементов и участка плавного увеличения площади поперечного сечения.

Осесимметричный вариант конфигурации может быть изменен. В частности, возможен боковой подвод потока. При этом конфигурация дефлекторов также может модифицироваться и представлять собой набор плоских перегородок, создающих лабиринтную структуру.



Рис. 8. Распределение модуля скорости (м/с) в момент времени t = 0.05 с

Fig. 8. Distribution of velocity magnitude (m/s) at time t = 0.05 s



Рис. 9. Распределение модуля скорости (м/с) в момент времени t = 0,1 с

Fig. 9. Distribution of velocity magnitude (m/s) at time t = 0.1 s



Рис. 10. Распределение модуля скорости (м/с) в момент времени t = 0,3 с **Fig. 10.** Distribution of velocity magnitude (m/s) at time t = 0.3 s

Эксперименты проводились в крупномасштабном гидрофизическом бассейне СПб ФИО РАН. В качестве оконечного устройства стенда использовался рассмотренный выше генератор ВК, эскиз которого представлен на рис. 11. Внешний вид генератора показан на рис. 12.

Стендовое оборудование включает воздушный компрессор, аккумулятор сжатого воздуха, емкость с границей раздела воды и воздуха с наддувом воздушной части и формирования повышенного давления в магистрали подачи воды (бытовой гидроаккумулятор для индивидуальных систем водоснабжения). Исходя из возможностей компрессора были подобраны трубопроводы и арматура проходным сечением 25,4 мм. Давление, которое может обеспечить компрессор составляет 8 атм.

Исполнительным элементом, обеспечивающим подачу водного импульса для формирования вихрей, является ранее упомянутый быстродействующий электромагнитный клапан. Управление быстродействующим электромагнитным клапаном производится программируемым электронным блоком.



Рис. 11. Эскиз генератора вихревых структур. *R*₀ — радиус отверстия в стенке. В качестве начала координат выбирается произвольная точка на краю отверстия. Ось *у* направлена к центру отверстия в плоскости стенки. Ось *х* нормальна к плоскости стенки. и и *v* — проекции скорости на соответствующие координатные направления (*x* и *y*)

Fig. 11. Schematics of the vortex structure generator. R_0 is the radius of the hole in the wall. An arbitrary point on the edge of the hole is selected as the origin. The y axis is directed towards the center of the hole in the wall plane. The x-axis is normal to the wall plane. u and v are projections of velocity to the corresponding coordinate directions (x and y)



Рис. 12. Внешний вид генератора вихревых структур **Fig. 12**. External view of the vortex structure generator

4. Результаты испытания макета генератора вихревых колец

В июне-июле 2024 года выполнены испытания макета генератора ВК на опытном стенде в крупномасштабном гидрофизическом бассейне СПбФ ИО РАН и проведены экспериментальные исследования.

Первоначально визуализация вихревых колец осуществлялась гидролизным газом, но в связи с тем, что пузырьки газа намного крупнее рэлеевского предела и быстро всплывают на поверхность, в экспериментах 2024 года визуализация производилась путем добавления в воду генератора раствора пищевого красителя.

В бассейне создавалась температурная стратификация — типичная зависимость температуры (Θ , °C) от глубины (H, м) приведена на рис. 13. Вблизи оси распространения вихрей на глубине 0.8–1 м градиент температуры составлял 12–14 °C/м.

На рис. 14–19 приведены типичные ситуации формирования и распространения ВК. В частности, на рис. 14 представлено вихревое кольцо, полученное при сравнительно малой безразмерной длине струи длине струи (порядка 3.5). Возраст кольца — порядка 2,5–3 с. На рис. 15 ВК получено из струи с безразмерной длиной около 10. Возраст кольца тот же. На рис. 16 представлено ВК, полученное из струи с безразмерной длиной порядка 16. Снимок сделан приблизительно через 0,5–1 с после формирования ВК. На рис. 17 показано ВК, полученной из относительно длинной струи тёплой воды, причем архимедовы силы в стратифицированной среде обусловили всплытие и некоторый разворот ВК в вертикальной плоскости. Более быстрым оказывается всплытие кольца, сформированного из воды со значительным содержанием воздуха (рис. 18). На рис. 19 показан процесс разрушения кольца непосредственно при его формировании (безразмерная длина струи > 20).

По результатам обработки видеозаписи определялись радиусы вихревых колец и торов. Оценивалась ошибка измерения размеров кольца и тора, равная ± 0,5 см.

Зависимость безразмерного радиуса кольца от безразмерной длины струи, формирующей ВК, приведена на рис. 20. Черным цветом обозначены данные опыта с учетом ошибок измерения (квадрат и вертикальные линии). Цифрами, означающими время в секундах от момента формирования кольца, обозначены графики, построенные по данным моделирования (рис. 3 и 4). Знаком «=» обозначен график, построенный по данным работ [1, 2]. Соответствующая зависимость безразмерного радиуса тора от безразмерной длины струи, формирующей ВК, приведена на рис. 21 с теми же обозначениями.

На рис. 22 показаны зависимости угла разворота вихревого кольца в вертикальной плоскости в стратифицированной среде от продольной координаты. Цифрами на графиках обозначена безразмерная длина струи. Прямоугольником отмечена наблюдаемая в экспериментах область значений углов разворота.



Рис. 13. Типичная зависимость температуры (Θ, °C) от глубины (*H*, м) в гидрофизическом бассейне

Fig. 13. Typical dependence of temperature (Θ , °C) on depth (H, m) in the hydrophysical water tank



- **Рис. 14.** ВК, полученное при безразмерной длине струи около 3,5.
- Fig. 14. Vortex structure (VS) obtained at a dimensionless jet length of approximately 3.5



Рис. 16. ВК, полученное при безразмерной длине струи около 16

Fig. 16. Vortex structure (VS) obtained at a dimensionless jet length of approximately 16



Рис. 18. ВК из сильно аэрированной струи **Fig. 18.** Vortex structure from a highly aerated jet



- **Рис. 15.** ВК, полученное при безразмерной длине струи около 10.
- **Fig. 15.** Vortex structure (VS) obtained at a dimensionless jet length of approximately 10



- Рис. 17. ВК из «теплой» струи с захватом воздуха
- Fig. 17. Vortex structure from a "warm" jet with air entrainment



Рис. 19. Разрушение ВК при большой длине струи **Fig. 19.** Destruction of the vortex structure at a large jet length



Рис. 20. Зависимость безразмерного радиуса кольца от безразмерной длины струи, формирующей ВК

Fig. 20. Dependence of the dimensionless radius of the ring on the dimensionless stroke length of the jet forming the vortex ring



Рис. 21. Зависимость безразмерного радиуса тора от безразмерной длины струи, формирующей ВК **Fig. 21.** Dependence of the dimensionless radius of the torus on the dimensionless stroke length

of the jet forming the vortex ring



Puc. 22. Зависимость угла разворота вихревого кольца в вертикальной плоскости от продольной координатыFig. 22. Dependence of the vortex ring turning angle in the vertical plane on the longitudinal coordinate





Fig. 23. Trajectories of vortex rings in the longitudinal plane during their surfacing

На рис. 23 представлены траектории вихревых колец в продольной плоскости при подаче в генератор тёплой в сравнении с температурой среды на горизонте установки генератора воды. Цифрами на графиках обозначено превышение температуры воды, подаваемой в генератор, над температурой на горизонте его установки; прямоугольниками отмечены наблюдаемые в экспериментах участки траекторий.

Результаты испытаний макета генератора ВК и экспериментальных исследований в гидрофизическом бассейне СПбФ ИО РАН позволяют сделать следующие выводы.

1. Размеры вихревых колец (рис. 20 и 21) достаточно близки к значениям, полученным при математическом моделировании при использовании как зависимостей, приведенных в источниках [1, 2 и др.], так и значений, полученных при решении уравнений (8) с разбиением расчетной области (от кромки отверстия до оси генератора) на 500 пространственных элементов.

2. При удовлетворительной безразмерной длине струи (порядка 10 и менее) вихревое кольцо формируется из воды, питающей генератор, массообмен с окружающей водной средой оказывается малым и кольцо сохраняет свою форму в течении первых десятков секунд, перемещаясь приблизительно на 5 метров (до противоположной стенки бассейна), незначительно увеличивая свои размеры (рис. 14 и 15).

3. При безразмерной длине струи более 20 вихревое кольцо практически разрушается в процессе формирования (рис. 19).

4. Значимое превышение температуры воды, питающей генератор, над температурой воды в бассейне на глубине установки генератора обусловливает быстрое всплытие даже хорошо сформированного кольца к поверхности с некоторым его вращением в продольной плоскости (рис. 17).

5. Достижение вихрем водной поверхности приводит к формированию двух плоских вихрей, вращающихся в противоположных направлениях и перемещающихся по поверхности.

6. Достижение вихревым кольцом дна или вертикальной преграды приводит к быстрому изменению исходной тороидальной формы и разрушению вихревого кольца.

7. Отрицательный температурный градиент (12−14 °С/м), обусловливающий также положительный пикноградиент (~6,5 кг/м⁴), приводит к некоторому незначительному развороту колец в продольной плоскости в случае, когда температура воды, питающей генератор, близка к температуре воды в бассейне на глубине установки генератора ВК.

5. Заключение

В работе опытным путем на моделирующем стенде в крупномасштабном гидрофизическом бассейне (при выраженной стратификации с вертикальным температурным градиентом более 10 °C/м) подтверждены имеющиеся в литературных источниках и вновь полученные расчетные соотношения, описывающие процессы формирования и эволюции вихревых колец, зарождающихся в водной среде при выбросе струи воды в затопленный объем. Результаты математического моделирования удовлетворительно соответствуют результатам, полученным в опыте. Установлено, что в определенных условиях (при безразмерной длине струи, формирующей кольцо 10 и менее) массообмен с окружающей водной средой оказывается малым

Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Капранов И.Е., Шпилев Н.Н., Яковчук М.С. Monakhov R.Yu., Rodionov A.A., Kapranov I.Ye., Shpilev N.N., Yakovchuk M.S.

и кольцо сохраняет свою форму в течении длительного времени, незначительно увеличивая свои размеры. Формирование генерирующей струи из более теплой в сравнении со средой воды, а также вертикальный температурный градиент обусловливают всплытие и незначительный разворот колец в продольной плоскости.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0029.

Funding

The work was performed under the State assignment FMWE-2024-0029.

Литература

- 1. *Владимиров В.А., Тарасов В.Ф.* Формирование вихревых колец // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. 1980. № 3, вып. 1. С. 3–11.
- 2. *Вуд Р.* Вихревые кольца // Библиотечка «КВАНТ» выпуск 4. Опыты в домашней лаборатории. М., Наука: Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1981. С. 13.
- 3. *Бебиева Я.С.* Формирование затопленных струй при различных начальных условиях // Альманах современной науки и образования, Тамбов, «Грамота», 2011. № 12 (55). С. 25–27.
- 4. Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур // Киев: Наукова думка, 1993. С. 72–221.
- 5. *Тарасов В.Ф.* Оценка некоторых параметров турбулентного вихревого кольца // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. СО. Институт гидродинамики. 1973. Вып. 14. С. 120–127.
- 6. *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.* Генерация кавитационных вихревых колец в воде // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2014. № 1 (14). С. 71–74.
- 7. Шмыглевский Ю.Д., Щепров А.В. Об осесимметричных вихревых образованиях в вязкой жидкости // Журнал вычислительно математики и математической физики. 1995. Т. 35, № 3. С. 472–478.
- 8. Ja'fari M., Shojae F.J., Jaworski A.J. Synthetic jet actuators: Overview and applications // International Journal of Thermofluids. 2023. Vol. 20. P. 100438. doi:10.1016/j.ijft.2023.100438
- 9. Zhou J., Tang H., Zhong S. Vortex Roll-Up criterion for synthetic jets // AIAA Journal. 2009. Vol. 47, N 5. doi:10.2514/1.40602
- 10. *Barton L. Smith, David J. Nani*. Effect of orifice shape on synthetic efficiency. UTAH STATE UNIVERSITY, Logan, Utah, 2012.
- 11. Jabbal M., Tang H., Zhong S. The effect of geometry on the performance of synthetic jet actuators // Conference: 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2006), At: Hamburg, Germany, September 2006.
- Tang H., Zhong S. Incompressible flow model of synthetic jet actuator // AIAA Journal. 2006, Vol. 44, N 4, P. 908–912. doi:10.2514/1.15633
- 13. *Gharib M.*, *Rambod E.*, *Shariff K*. A universal time scale for vortex ring formation // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 360. P. 121–140. doi:10.1017/S00221120970084107
- 14. *Xiong D., Zhixun X., Zhenbing L., Lin W.* A novel optimal design for an application-oriented synthetic jet actuator // Chinese Journal of Aeronautics. 2014. 27(3) P. 514–520. doi:10.1016/j.cja.2014.04.002
- 15. *Ганеев Р.А., Хафизов И.Ф., Бакиров И.К., Зарипова Л.Х.* Исследование вихревых потоков жидкости для повышения эффективности приборов пожаротушения // Нефтегазовое дело. 2022. № 6. С. 30–43. doi:10.17122/ogbus-2022-6-30-43
- 16. *Гущин В.А., Матюшин П.В.* Механизм образования вихрей в следе за сферой для диапазона 200 < Re < 380 // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 5. С. 135–151.
- 17. *Гущин В.А., Матюшин П.В.* Математическое моделирование пространственных течений несжимаемой жидкости // Математическое Моделирование. 2006. Т. 18, № 5. С. 5–20.
- 18. Дудоладов И.В., Таганов Г.И. Объединение вихревых образований в плоском течении несжимаемой жидкости // Ученые записки ЦАГИ. 1977. Т. VIII, № 4. С. 29–33.
- 19. *Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д.* Регулярные и сингулярные компоненты периодических движений в толще жидкости // Прикладная математика и механика. 2007. Т. 71, Вып. 5. С. 844–854.
- Луговцов Б.А. Турбулентные вихревые кольца // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. СО Институт гидродинамики. 1979. Вып. 38. С. 71–88.
- 21. Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В., Тряпина В.А. Визуализация структуры течения в противоточной вихревой трубе // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15, № 10. С. 439–447

- 22. Чашечкин Ю.Д., Байдулов В.Г., Бардаков Р.Н., Васильев А.Ю., Кистович А.В., Миткин В.В., Прохоров В.Е., Степанова Е.В. Механика свободных стратифицированных течений // Препринт ИПМех РАН № 876. М.: ИПМех РАН. 2008. 127 с.
- 23. *Ахметов Д.Г.* Модель формирования вихревого кольца // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 6(292). С. 909–918.
- 24. *Ахметов Д.Г.* Формирование и основные параметры вихревых колец // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 5(262). С. 70–83.
- 25. Ахметов Д.Г., Тарасов В.Ф. О структуре и эволюции вихревых ядер // Прикладная механика и техническая физика. 1986. Т. 27, № 5. С. 68–73.
- 26. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. Новосибирск: Гео, 2007. 151 с.
- 27. Волков К.Н. Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91).
- 28. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М, 2008. 368 с.

References

- 1. Vladimirov V.A., Tarasov V.F. The formation of vortex rings. *Izvestiya. SB AN USSR. Seria Technicheskih Nauk.* 1980;3(1):3–11. (in Russian).
- 2. Wood R. *Vortex Rings*. Library "QUANTUM" issue 4. Experiments in a home laboratory. M.: Nauka; Gl. ed. Phys. mat. lit. 1981. P. 13. (in Russian).
- 3. Bebieva Ya.S. Formation of flooded jets under various initial conditions. *Almanac of Modern Science and Education*. Tambov: Gramota; 2011. № 12 (55). P. 25–27. (in Russian)
- 4. Meleshko V.V., Konstantinov M. Yu. Dynamics of vortex structures. Kiev: Naukova dumka; 1993. P. 72–221 (In Russian).
- Tarasov V.F. Evaluation of some parameters of a turbulent vortex ring // Dynamics of a continuous medium: Collection of scientific Tr. / USSR Academy of Sciences. Siberian Branch. Institute of Hydrodynamics. 1973;14:120–127 (In Russian).
- 6. Teslenko V.S., Drozhzhin A.P., Medvedev R.N. Generation of cavitation vortex rings in water. *Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies.* 2014;1(14):71–74 (In Russian).
- 7. Shmyglevsky Yu.D., Shcheprov A.V. Axisymmetric vortex formations in a viscous liquid. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1995;35(3):379–382.
- 8. Ja'fari M., Shojae F.J., Jaworski A.J. Synthetic jet actuators: Overview and applications. *International Journal of Thermo fluids*. 2023;20:100438. doi:10.1016/j.ijft.2023.100438
- 9. Zhou J., Tang H., Zhong S. Vortex Roll-Up criterion for synthetic jets. AIAA Journal. 2009;47(5). doi:10.2514/1.40602
- Barton L. Smith, David J. Nani. Effect of orifice shape on synthetic efficiency. UTAH STATE UNIVERSITY, Logan, Utah, 2012.
- 11. Jabbal M., Tang H., Zhong S. The effect of geometry on the performance of synthetic jet actuators. *Conference: 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences* (ICAS2006), At: Hamburg, Germany, September 2006.
- 12. Tang H., Zhong S. Incompressible flow model of synthetic jet actuator. *AIAA Journal*. 2006;44(4):908–912. doi:10.2514/1.15633
- Gharib M., Rambod E., Shariff K. A universal time scale for vortex ring formation *Journal of Fluid Mechanics*. 1998;360:121–140. doi:10.1017/S0022112097008410
- 14. Xiong D., Zhixun X., Zhenbing L., Lin W. A novel optimal design for an application-oriented synthetic jet actuator. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014;27(3):514–520. doi:10.1016/j.cja.2014.04.002
- 15. Ganeev R.A., Hafizov I.F., Bakirov I.K., Zaripova L.H. Investigation of vortex fluid flows to increase the efficiency of fire extinguishing devices. *Oil and Gas Business*. 2022;6:30–43. doi:10.17122/ogbus-2022-6-30-43 (in Russian).
- Gushchin V.A., Matyushin P.V. Vortex formation mechanisms in the wake behind a sphere for 200 < RE < 380. *Fluid Dynamics*. 2006;41(5):795–809. doi:10.1007/s10697-006-0096-x
- 17. Gushchin V.A., Matyushin P.V. Mathematical modelling of the 3D incompressible fluid flows. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2006;18(5): 5–20 (In Russian).
- 18. Dudoladov I.V., Taganov G.I. Unification of vortex formations in a flat incompressible fluid flow. *Scientific Notes of TsAGI*. 1977; VIII(4):29–33 (in Russian).
- 19. Kistovich A.V., Chashechkin Yu.D. Regular and singular components of periodic of flows in the fluid interior. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2007;71(5):762–771.

- 20. Lugovtsov B.A. Turbulent vortex rings. *Dynamics of a continuous medium: Collection of scientific tr.* USSR Academy of Sciences. Siberian Branch. Institute of Hydrodynamics. 1979;38:71–88 (In Russian).
- 21. Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V., Tryapina V.A. Flow structure visualization in the reverse-flow vortex tube. *Thermal Processes in Engineering*. 2023;15(10):439–447 (In Russian).
- 22. Chashechkin Yu.D., Baidulov V.G., Bardakov R.N., Vasiliev A. Yu., Kistovich A.V., Mitkin V.V., Prokhorov V.E., Stepanova E.V. Mechanics of free stratified flows. Preprint IPMeh RAS No. 876. M.: IPMeh RAS; 2008. 127 p. (In Russian).
- 23. Akhmetov D.G. Model of vortex ring formation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2008;49(6):909–918. doi:10.1007/s10808-008-0113-4
- 24. Akhmetov D.G. Formation and basic parameters of vortex rings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001;42(5):794–805.
- 25. Akhmetov D.G., Tarasov V.F. On the structure and evolution of vortex nuclei. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1986;27(5):68–73.
- 26. Akhmetov D.G. Vortex rings. Novosibirsk: Geo; 2007. 151 p. (in Russian).
- 27. Volkov K.N. Methods of visualization of vortex flows in computational gas dynamics and their application in solving applied problems. *Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and Optics.* 2014;3(91). (in Russian).
- 28. Volkov K.N., Yemelyanov V.N. Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows. M., 2008. 368 p. (in Russian).

Об авторах

- МОНАХОВ Роман Юрьевич, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук ИО РАН, SPIN-код (РИНЦ): 8078-0868, e-mail: monakhov-62@mail.ru
- РОДИОНОВ Анатолий Александрович, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» СПбФ ИО РАН, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru
- КАПРАНОВ Илья Евгеньевич, ведущий инженер по расчетам, АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»», кандидат технических наук, РИНЦ AuthorID: 546230, e-mail: mrkap@yandex.ru.
- ШПИЛЕВ Николай Николаевич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-3638-3253, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125, e-mail: nn.shpilev@gmail.com
- ЯКОВЧУК Михаил Сергеевич, доцент БГТУ «ВОЕМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-9770-0841, Scopus AuthorID: 57039066300, SPIN-код (РИНЦ): 4569-2340, e-mail: mjakovchuk@mail.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-5

UDC 551.463.5

© V. V. Suslin^{1*}, O. B. Kudinov¹, A. A. Latushkin¹, I. A. Sutorikhin², V. V. Kirillov², O. V. Martynov¹, 2024

¹Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1 Molodezhnaya Str., Altai Territory, Barnaul, 656037, Russia *slava.suslin@mhi-ras.ru

RELATIONSHIP OF BIO-OPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE TELETSKOYE AT DIFFERENT HORIZONS ACCORDING TO THE RESULTS OF AN EXPEDITION IN AUGUST 2023

Received 21.06.2024, Revised 10.12.2024, Accepted 12.12.2024

Abstract

To solve inverse problems, in particular, the recovery of optically active substances from hydro-optical measurements, it is necessary to clearly understand the nature of these dependencies. The work analyzes such relationships between the fluorescence of dissolved organic matter, chlorophyll-*a* fluorescence and the beam attenuation coefficient at a wavelength of 660 nm based on direct measurements performed in Lake Teletskoye in August 2023. It is shown that the waters of Lake Teletskoye belong to the so-called waters of the second type (CASE2) according to the Morel classification, i. e. optically complex waters.

Keywords: Lake Teletskoye, profiles of water bio-optical parameters, beam attenuation coefficient, chlorophyll-*a* and dissolved organic matter fluorescence

УДК 551.463.5

© В. В. Суслин¹*, О. Б. Кудинов¹, А. А. Латушкин¹, И. А. Суторихин², В. В. Кириллов², О. В. Мартынов¹, 2024 ¹Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская д. 2, Севастополь, 299011 ²Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038 РФ Алтайский край г. Барнаул ул. Молодежная, 1 *slava.suslin@mhi-ras.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА НА РАЗНЫХ ГОРИЗОНТАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ В АВГУСТЕ 2023 ГОДА

Статья поступила в редакцию 21.06.2024, после доработки 10.12.2024, принята в печать 12.12.2024

Аннотация

Для решения обратных задач, в частности, восстановления концентрации оптически активных веществ по гидрооптическим измерениям, необходимо использовать характер этих связей. В работе проведён анализ таких связей между флуоресценцией растворённого органического вещества, флуоресценцией хлорофилла-*a* и показателем ослабления направленного света на длине волны 660 нм на основе прямых гидрооптических измерений *in situ*, выполненных в ходе комплексной экспедиции на Телецком озере в августе 2023 года. Показано, что на разных глубинных горизонтах воды Телецкого озера относятся к так называемым водам второго типа (*CASE2*) по классификации Мореля, т. е. оптически сложным водам.

Ключевые слова: Телецкое озеро, профили биооптических параметров воды, показатель ослабления света, флуоресценция хлорофилла-*a* и растворенного органического вещества

Ссылка для цитирования: *Суслин В.В., Кудинов О.Б., Латушкин А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Мартынов О.В.* Взаимосвязь биооптических характеристик Телецкого озера на разных горизонтах по результатам экспедиции в августе 2023 года // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. 71–76. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-5 For citation: Suslin V.V., Kudinov O.B., Latushkin A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Martynov O.V. Relationship of bio-optical characteristics of Lake Teletskoye at different horizons according to the results of an expedition in August 2023. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):71–76. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-5

1. Introduction

Lake Teletskoye is the largest body of water in the Ob River basin. It is located in the northeastern part of the Altai Mountains at an altitude of 434 m above sea level and is part of the lake-river system of Eastern Altai[1]. The Secchi disk depth in summer reaches a maximum value [2] of 12–15 m. The average width of the lake is 2.9 km and the maximum is 5.2 km, the surface area is 227 km². Due to its great depth (average depth 181 m, maximum 323 m), it contains 41.1 km³ of fresh water. According to its hydrothermal characteristics, the lake is dynamic with two periods of complete convective mixing to maximum depths due to the thermal bar (May-July and October-December) [3].

According to Selegey's phenomenological model [3] the period of summer heating of the lake ends in the second ten days of July. A common feature of summer conditions is that the lake is thermally stably stratified and reaches surface temperatures [4] above 10 °C. In the practice of assessing water quality, as well as the bioproductivity of water bodies, Secchi disk depth was used. Secchi disk depth depends on the content of mineral and organic suspended matter and dissolved organic matter in the water. Thus, this hydro-optical parameter contains information about the content of substances in water that are indicators of the ecological state of the reservoir [5, 6].

To solve the problem of restoring the concentration of optically active components from the measured optical parameters of water, it is necessary to have an idea of the nature of these relations. For this purpose, three key bio-optical parameters of the aquatic environment were selected. The first is the fluorescence spectrum of colored dissolved organic matter (*fDOM*), the concentration of which affects the absorption of light in the spectrum short-wave part. The second parameter is the beam attenuation coefficient at a wavelength of 660 nm (*Turb*), which is associated with the concentration of suspended particles (phytoplankton, mineral suspended matter and detritus) contained in the water. The third parameter is the fluorescence spectrum of chlorophyll-a (*fChla*) associated with phytoplankton, which contributes to both the total light absorption and light scattering [7].

The purpose of this work is to investigate the features of the relationships between key bio-optical characteristics in the upper hundred-meter layer of the lake, associated with the concentration of optically active absorbing and scattering substances, both living and non-living components.

2. Materials and Methods

The work analyzes field data obtained quasi-synchronously using hydro-optical sounding equipment, including a multichannel fluorimeter [8], developed in the department of Optics and Marine Biophysics of the Marine Hydro-physical Institute of RAS, and the hydrophysical complex "CONDOR"[9].

Vertical profiles of temperature (*T*) and beam attenuation coefficient at 660 nm (*BAC* or *Turb*) were obtained by the "CONDOR" complex. The submersible autonomous complex "CONDOR" performed synchronous measurements of temperature (*T*), beam attenuation coefficient (*BAC* or *Turb*) at 660 nm, calibrated in turbidity units. Technical characteristics and detailed instrument description are given in [9]. *BAC* in the red part of the spectrum is determined by the scattering properties of the total suspended matter and does not depend on the absorption of the colored component of the dissolved organic matter [10]. *BAC* calibration was carried out in laboratory conditions before the expedition based on the results of measurements of formazin suspension solutions with a given concentration (ftu units). According to [11], beam attenuation meters can be calibrated in both ftu and m⁻¹. The temperature measurement range was from -2 to 35 °C with an accuracy of 0.04 °C, and the *BAC* measurement range was from 0.2 to 10 ftu with a resolution of 0.01 ftu.

The multichannel fluorimeter performed quasi-synchronous measurements of the fluorescence profiles of dissolved organic matter (*fDOM*) (excitation wavelength 360 nm, recording wavelength 570 nm) and chlorophyll-a(*fChla*) (excitation wavelength 460 nm, recording wavelength 678 nm).

The range of measured values of *fChla* is from 0.05 to 45 µg/L. Intercalibration of measurements with the Turner Design Chl-a sensor was carried out using synchronous measurements of vertical profiles. The data correlation coefficient was r = 0.93 with a statistical significance coefficient of p < 0.05. No such work has been done for *fDOM*. *fDOM* data are presented in relative units and are indicative, i. e. they show qualitative changes, not quantitative ones.

The measurements were carried out on board the ship-laboratory of the Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of RAS.

Figure 1 shows a map of 11 stations at which synchronous measurements were made with a multichannel fluorimeter and the "CONDOR" complex.

Table 1 provides a list of stations where synchronous measurements were performed using a multichannel fluorimeter and a "CONDOR" complex. The total number of synchronous stations is 11. The maximum depth to which synchronous measurements were carried out by both instruments was about 150 m. The average value of the upper mixed layer (UML) for these stations is 7 m. The UML was calculated based on the condition of a temperature drop of 2 °C from its value on the surface. The average value of the euphotic zone depth (Z_{eu}) was 13 m.
Relationship of bio-optical characteristics of Lake Teletskoye at different horizons according to the results of an expedition... Взаимосвязь биооптических характеристик Телецкого озера на разных горизонтах по результатам экспедиции...



Fig. 1. Map of Lake Teletskoye (*a*) and station's (*b*) locations at which synchronous measurements were performed with a multichannel fluorimeter and the "CONDOR" complex

Table 1

List of stations where synchronous measurements were performed using the multichannel fluorimeter
and the "CONDOR" complex and some of their characteristics

N	Station symbol	Z _{UML} , m	Z _{EU} , m	Maximum probing depth, m
1	001	7	14.0	22.6
2	005	14	12.2	41
3*	131k	20.6	12.6	21
4*	002	5	13.0	50.2
5	132k	10	13.0	20.2
6	021	5.2	9.2	24.8
7*	0212	3	13.4	148
8	023	3.4	15.0	34.8
9*	025	5.6	16.2	43.6
10	028	4.8	15.2	47.4
11	1s	8	14.8	47.4

* the profiles of the measured characteristics of the lake water column for these stations are shown in Fig. 2 and 3.

In Fig. 2 and Fig. 3 shown examples of measurements of profiles *Turb* (Fig. 2a, Fig. 3a), *T* (Fig. 2b, Fig. 3b) with the "CONDOR" complex and profiles *fDOM* (Fig. 2c, Fig. 3c) and *fChla* (Fig. 2d, Fig. 3d) with the multichannel fluorimeter at stations 131k, 025 and 002. These examples show the characteristic scales of variability of bio-optical parameters with depth in the estuary area of the station 131k, at station 025 in the northern deep-water part of the lake which slightly exposed to river flow, and in the southern part of the lake on station 002, which is influenced by the main Chulyshman river flow to the lake.

Suslin V.V., Kudinov O.B., Latushkin A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Martynov O.V. Суслин В.В., Кудинов О.Б., Латушкин А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Мартынов О.В.



Fig. 2. Examples of measured profiles Turb (a), T (b), fDOM (c) and fChla (d) at stations 131k, 025 and 002



Fig. 3. Examples of measured profiles Turb (a), T (b), fDOM (c) and fChla (d) at station 0212

Noteworthy is the different behavior of *Turb* in the upper water layer of the lake at station 131k and station 002. Both stations are located in the estuary areas, but at station 002 the value of *Turb* is significantly greater than at station 131k, which indicates a higher level of entering of suspended material from the river Chulyshman mouth. The *fDOM* values in this layer for these stations have the opposite nature, which indicates a low content of dissolved organic matter in the river Chulyshman compared to the waters of the lake.

4. Results and discussion

The results of synchronous measurements for all stations are presented in Fig. 4.

They show the relationship between bio-optical characteristics in Lake Teletskoye in August 2023: *Turb* and *fDOM* (Fig. 4a); *Turb* and *fChla* (Fig. 4b); *fChla* and *fDOM* (Fig. 4c). Figure 4d demonstrates the relationship between *T* and *fDOM*. This was done to show the relationship between *fDOM* and density, and also the presence of a subsurface *fDOM* maximum, since namely temperature in the absence of salinity determines the density stratification of the lake.

Let us note the main features of the relationships between the considered bio-optical parameters of the lake water column (for depths of 0-150 m, in warm periods of year). The first is the lack of connection between *Turb* and *fDOM* (Fig. 4a), which is an indisputable fact that the waters of Lake Teletskoye belong to the Case 2 type [12]. The same applies to the connection between *Turb* and *fChla* (Fig. 4b) for the photosynthesis layer. Secondly, a negative correlation in the photosynthesis layer occurs for *fChla* and *fDOM* (Fig. 4c) and between *T* and *fDOM* (Fig. 4d), but it is "blurred", i. e. there is no one-to-one correspondence.

Relationship of bio-optical characteristics of Lake Teletskoye at different horizons according to the results of an expedition... Взаимосвязь биооптических характеристик Телецкого озера на разных горизонтах по результатам экспедиции...



Fig. 4. Relationship between bio-optical characteristics in Lake Teletskoye in August 2023: *Turb* and *fDOM* (*a*); *Turb* and *fChla* (*b*); *fChla* and *fDOM* (*c*); *T* and *fDOM* (*d*), where *Turb* is the beam attenuation coefficient at 660 nm (in turbidity units); *fDOM* – fluorescence signal of colored dissolved organic matter in rel. units; *T* – water temperature in Centigrade (°C). Various horizons are shown by dots of different colors: 1 – below the average value of the photosynthesis layer (13 m); 2 – layer between the lower boundary of photosynthetic layer Z_{eu} and the average value of the lower boundary of the upper mixed layer (7 m); 3 – upper mixed layer (0–7)

5. Conclusions

The final conclusions can be formulated as follows:

- the absence of a relation between *Turb* and *fDOM* in the entire 150 m layer is an indisputable fact that the waters of Lake Teletskoye belong to the Case 2 type. The same statement is true for the connection between *Turb* and *fChla* in the photosynthesis layer;

- there is some negative correlation into the photosynthesis layer for fChla and fDOM and between T and fDOM in the entire 150 m layer.

Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the frameworks of government assignments: for MHI RAS № FNNN-2024-0012, and for IWEP SB RAS № 0306-2021-0001 agreements with the administration of the Altai State Nature Reserve. The expeditionary work used scientific equipment of the CSU "Research Vessels of the IWEP SB RAS".

References

- 1. Selegey V.V., Selegey T.S. Lake Teletskoe. *Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. 143 p. (in Russian).
- 2. Selegey V., Dehandshutter B., Klerks Y., Vysotsky E. Physical and geographical geological environment of Lake Teletskoye. *Tervueten-Belgium Publisher: Musee Royal De L'Afrique Centrale*, 2001. 322 p.
- 3. Selegey V.V. Lake Teletskoe. *Essays on history*. Book 1. Novosibirsk: OVSET; 2009. 119 p. (in Russian).
- 4. Pushistov P. Yu., Viktorov E.V. *Applied systems analysis of circulations and thermal regime of Lake Teletskoye*. Barnaul: Five Plus; 2016. 149 p. (in Russian).
- 5. Lee M.E., Latushkin A.A., Martynov O.V. Long-term Transparency Variability of the Black Sea Surface Waters. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018;11(3):40–46. doi:10.7868/S207366731803005X (in Russian).
- 6. Man'kovsky V.I. Spectral contributions of the components of seawater to the beam attenuation coefficient in surface waters of the Mediterranean Sea. *Physical Oceanography*. 2012;21(5):305–319. doi:10.1007/s11110-012-9124-z
- 7. Kopelevich O.V. Ocean Optics. V1. *Physical optics of the ocean. Low-parameter models of the optical properties of sea water.* Moscow: Nauka; 1983. P. 208–234 (in Russian).
- 8. Kudinov O.B., Lee M.E. *Registration of Phytoplankton Fluorescence Using an Experimental Sounding Probe. Fundamental and Applied Hydrophysics.* 2023;16(4):116–128. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-10 (in Russian).
- 9. Hydrobiophysical multiparametric submersible autonomous complex "CONDOR", URL: https://dent-s.narod.ru/kondor.html (date of access: 11.09.2024).
- 10. Erlov N.G. Optics of the sea. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980. 248 p. (in Russian).
- 11. Ronald J., Zaneveld V., Spinrad R.W., Bartz R. Optical properties of turbidity standards. *Ocean Optics VI. SPIE*. 1980;208:159–169.
- 12. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. 1977;22(4):709–722. doi:10.4319/lo.1977.22.4.0709 (date of access: 20.12.2023).

About the Authors

- SUSLIN, Vyacheslav V., Leading Researcher, Department of Ocean Dynamics, Marine Hydrophysical Institute of RAS, Cand. Sc. (Phys.-Math.), SPIN-code (РИНЦ): 1681-7926, ORCID: 0000-0002-8627-7603, Scopus AuthorID: 6602501867, e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru
- KUDINOV, Oleg B., Junior Researcher, Department of Marine Optics and Biophysics, Marine Hydrophysical Institute of RAS, Cand. Sc. (Techn.), SPIN-code (РИНЦ): 2248-7034, e-mail: obk91@mail.ru
- LATUSHKIN, Aleksandr A., Researcher, Department of Optics and Biophysics of the Sea, Marine Hydrophysical Institute of RAS, Cand. Sc. (Geogr.), ORCID: 0000-0002-3412-7339, Scopus AuthorID: 56298305600, WoS ResearcherID: U-8871-2019, SPIN-code (РИНЦ): 1239-2858, e-mail: sevsalat@gmail.com
- SUTORIKHIN, Igor A., Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of RAS, Principal Scientist Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, ORCID: 0000-0003-3029-7215, Scopus AuthorID: 12789775100, WoS ResearcherID: I-9333-2018, SPIN-code (РИНЦ): 6819-2512, e-mail: sia@iwep.ru
- KIRILLOV, Vladimir V., Head of the Laboratory of Aquatic Ecology, Institute for Water and Environmental Problems, Associate Professor, Siberian Branch of RAS, Cand. Sc. (Biol.), ORCID: 0000-0001-9626-7153, Scopus AuthorID: 35233910500, WoS ResearcherID: I-9333-2018, SPIN-code (РИНЦ): 7749-7710, e-mail: vkirillov@iwep.ru
- MARTYNOV, Oleg V., Senior Researcher, Department of Marine Optics and Biophysics, Marine Hydrophysical Institute of RAS, Cand. Sc. (Techn.), Scopus AuthorID: 57201603369, SPIN-code (РИНЦ): 9669-6935, e-mail: oleg.martynov.49@mail.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6

УДК 551.46.06+597.56

© А. А. Коник^{1*}, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, Е. И. Свергун¹, Д. А. Романенков¹, Е. В. Софьина^{1,4}, А. И. Варкентин^{1,5}, О. Б. Тепнин^{1,5}, Д. Я. Саушкина^{1,5}, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург ³Морской гидрофизический институт, 299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь

⁴Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, ул. Воронежская, д. 79, г. Санкт-Петербург

⁵Камчатский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», 683000, ул. Набережная, д. 18, г. Петропавловск-Камчатский *konikrshu@gmail.com

ВНУТРИСУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ВОД И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИКРЫ МИНТАЯ В ГЛУБОКОВОДНЫХ КАНЬОНАХ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА: НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПЕРИОД НЕРЕСТА

Статья поступила в редакцию 23.09.2024, после доработки 01.11.2024, принята в печать 16.11.2024

Аннотация

На шельфе и континентальном склоне Тихого океана вдоль полуострова Камчатка приливная динамика является значимым, но недостаточно изученным фактором формирования изменчивости гидрологической структуры вод. Эта изменчивость влияет на распределение ранних стадий развития важнейшего объекта отечественного промысла — восточнокамчатскую популяцию минтая, основной нерест которого происходит в глубоководных каньонах Авачинского и Кроноцкого заливов. Целью статьи является описание особенностей разработанной методики натурного эксперимента по изучению влияния гидрофизических процессов, обусловленных приливом, на распределение икры минтая и краткое представление ее применения в рамках экспедиционных работ в глубоководных каньонах Авачинского залива. В рамках исследования были проведены два специализированных эксперимента в «Центральном» и «Северном» каньонах в апреле 2024 г. в сроки, близкие к пику нереста минтая. Даты выполнения измерений выбирались в период сизигийного прилива, когда влияние приливной динамики на характеристики среды максимально. Методика экспериментальной работы основывалась на учащенных гидрологических измерениях и послойных обловах ихтиопланктона, выполнявшихся в разные фазы прилива за период более суток. В работе представлены результаты профилирования в привязке к данным моделирования приливной динамики. Установлено, что амплитуда колебания глубоководного термоклина между теплым и холодным промежуточными слоями, залегающего на глубине 320-420 м, составляет около 50 м и имеет выраженный суточный период — в «Центральном» каньоне — и полусуточный — в «Северном» каньоне. По данным измерений описана изменчивость распределения икры минтая в зависимости от колебания термоклина. Представленные результаты показывают значимость приливной ритмики в изменчивости гидрофизических процессов, которые потенциально влияют на перемещения икры и её развитие в глубоководных каньонах Авачинского залива.

Ключевые слова: вертикальная структура вод, прилив, внутренние приливные волны, распределение икры минтая, районы глубоководного нереста, каньоны Авачинского залива, Тихий океан, FESOM-с

UDC 551.46.06+597.56

©A.A. Konik^{1*}, A.V. Zimin^{1,2}, O.A. Atadzhanova^{1,3}, E.I. Svergun¹, D.A. Romanenkov¹, E.V. Sofina^{1,4}, A. I. Varkentin^{1,5}, O. B. Tepnin^{1,5}, D. Ja. Saushkina^{1,5}, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaja Emb., St. Petersburg, 199034, Russia

³Marine Hydrophysical Institute, 2 Kapitanskaja Str., Sevastopol, 299011, Russia

⁴Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaja Str., St. Petersburg, 192007, Russia

Ссылка для цитирования: *Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я.* Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива: натурный эксперимент в период нереста // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 77–89. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6

For citation: Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D. Ja. Intra-Day Variability of Vertical Water Structure and Distributions Walleye Pollock Eggs in the Deep-Sea Canyons of Avacha Bay: A Field Experiment During the Spawning Period. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):77–89. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6

Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja.

⁵Kamchatka branch of "Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography" ("KamchatNIRO"), 18 Naberezhnaja Str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia *konikrshu@gmail.com

INTRA-DAY VARIABILITY OF VERTICAL WATER STRUCTURE AND DISTRIBUTIONS WALLEYE POLLOCK EGGS IN THE DEEP-SEA CANYONS OF AVACHA BAY: A FIELD EXPERIMENT DURING THE SPAWNING PERIOD

Received 23.09.2024, Revised 01.11.2024, Accepted 16.11.2024

Abstract

Tidal dynamics along the shelf break and continental slope of the Kamchatka Peninsula, adjacent to the Pacific Ocean, are a significant but underexplored factor influencing the hydrological variability. This variability affects the distribution of early life stages of the Eastern Kamchatka population of Walleye pollock, a key species for Russian fisheries. Its spawning occurs mainly in the deep-sea canyons of Avacha and Kronotsky Bays. This study aims to describe the methodology developed to investigate the impact of tidally driven hydrophysical processes on pollock egg distribution, with a focus on its application in the deep-sea canyons of Avacha Bay. Two experiments were conducted in the "Central" and "Northern" canyons during the peak of pollock spawning in April 2024, coinciding with the spring tide when tidal effect on the environment is maximized. The experimental methodology was based on frequent hydrological profiling and layer-by-layer sampling of ichthyoplankton, carried out over a day. The study identified a 50-meter amplitudes of vertical oscillation of the thermocline, located at 320–420 meter between warm and cold intermediate layers, with a distinct diurnal rhythm in the "Central" canyon and semidiurnal one in the "Northern" canyon. These results highlight the critical role of tidal dynamics in shaping hydrophysical variability, which in turn potentially affects pollock eggs vertical redistribution and development in the deep-sea canyons of Avacha Bay.

Ключевые слова: vertical water structure, tides, internal tidal waves, distribution of pollock eggs, deep-sea spawning areas, canyons of Avacha Bay, Pacific Ocean, FESOM-c

1. Введение

Минтай (*Gadus chalcogrammus*) является одним из ключевых пелагических видов экосистемы северной части Тихого океана и важным объектом отечественного и мирового рыболовства. По общему мировому вылову минтай уступает только перуанскому анчоусу [1]. В тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатскому полуострову, обитает одна из крупных популяций этого вида — восточнокамчатская [2]. Одним из ключевых районов размножения данной популяции являются глубоководные каньоны Авачинского залива. Основное икрометание минтая в каньонах происходит глубже 300 м и является адаптацией к комплексу квазистационарных гидрологических условий, формирующихся на этих локальных участках. Здесь же происходит стагнация макропланктона, который является пищей личинок минтая при переходе их на экзогенное питание [3]. Из икринок, выметанных в каньонах, предличинки выклевываются в горизонте около 180 м [4]. По мере дальнейшего развития, они всплывают в поверхностные слои, где выходят изпод защищающего действия каньонов и попадают под влияние течений. При благоприятном направлении течений, они либо остаются в системе каньона, либо выносятся в шельфовую зону [5]. Неблагоприятным считается вынос личинок в открытую часть океана.

Развитие и выживаемость ранних стадий развития минтая во многом зависит от особенностей термодинамических условий среды [6]. Они формируются под влиянием степени «суровости» предшествовавшего осенне-зимнего выхолаживания, которое определяет интенсивность развития вертикального перемешивания; структуры основной струи холодного Камчатского течения; особенностей текущего весеннего прогрева и ветрового перемешивания. Комбинация перечисленных процессов в апреле на акватории формирует трехслойную структуру вод: тонкий слой весеннего прогрева (2-3 °C) толщиной несколько метров, ниже холодный промежуточный слой (XПС) с аномально низкими значениями температуры (до -1 °C) толщиной до 400 м и еще глубже теплый промежуточный слой (ТПС) с температурой в ядре 3–3,2 °С и толщиной порядка 100–150 м. При этом основной нерест происходит именно в области границы ХПС и ТПС на глубинах 200-500 м [4]. Граница между слоями отличается значительной межгодовой, сезонной и короткопериодной изменчивостью. Так, по результатам суточных наблюдений, выполненных в 2006 г. в одном из глубоководных каньонов Авачинского залива, показано, что область термоклина между этими слоями совершала вертикальные перемещения с амплитудой 50 м и периодом около полусуток. Это дало основание авторам выдвинуть гипотезу о том, что эти относительно короткопериодные колебания термоклина, вероятно связанные с внутренними волнами, могут влиять на перемещения икры минтая. Вертикальные смещения могут быть критичны для ранних стадий рыб. Можно предположить, что подъем (опускание) икры на несколько десятков метров за несколько часов может напрямую сказываться на увеличении ее смертности.

Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах... Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay...

Исследованию влияния внутренних, в том числе приливных, волн на перераспределение ихтиопланктона посвящен ряд немногочисленных работ. В 1982 г. путем использования трассеров, размещавшихся в областях поверхностных проявлений внутренних волн, была продемонстрирована возможность их влияния на перенос планктона [7]. Хотя поверхностные трассеры иногда не показывали чистого горизонтального смещения, в других случаях они смещались на 1–2 км к берегу за несколько часов. В 2009 г. на основе тралово-акустических съемок, было показано влияние приливных колебаний на распределение ихтиопланктона и взрослых особей рыб, обитающих на мелководной отмели недалеко от залива Мен в Атлантическом океане [8]. С тех пор был проведен целый ряд полевых экспериментов и также модельных расчетов, сведения о которых обобщены в [9]. Это позволило установить, что внутренние волны влияют на локальную среду обитания прибрежных морских организмов: либо путем их вертикального перемещения, либо путем адвекции вод с различными свойствами. Направление и величина переноса, испытываемого пассивными плавающими организмами во внутренних волнах, зависят от глубины и способности к вертикальной миграции. Стоит отметить, что линейные внутренние волны сами по себе не вызовут значительного переноса организмов, скорее всего, они будут способствовать их попаданию в зону действия течений, осуществляющих их вынос за пределы благоприятных зон для развития икры и личинок. Согласно исследованиям [10], постоянная полусуточная внутренняя приливная волна, наблюдаемая в верхней части подводного каньона залива Монтерей, приводит к регулярным внутренним борам и забросам холодных субтермоклинных и богатых питательными веществами вод на прилегающий шельф, тем самым подпитывая здесь первичную продукцию. Эти же перемещающиеся гидравлические скачки (внутренние боры) могут транспортировать личинки пелагических рыб за пределы каньона. Однако в Авачинксом заливе широко распространены нелинейные (короткопериодные) внутренние волны [11], которые в отличие от линейных могут приводить к значительным горизонтальным переносам пассивных частиц. Сведения об их постоянном присутствии на акватории были получены по данным контактных наблюдений [12], выполненных как в глубоководной части залива, так и на шельфе у мыса Шипунский. Представление о характеристиках нелинейных внутренних волн и их постоянном присутствии на акватории были расширены по результатами круглогодичных спутниковых наблюдений [13]. При этом, как показано в [14], наиболее вероятный механизм генерации нелинейных внутренних волн связан с трансформацией внутреннего прилива. Этот вывод косвенно подтверждает предположение о потенциальной возможности значимого влияния гидрологических процессов, обусловленных приливом, на распределение икры минтая в глубоководных каньонах. Предполагается, что в результате этих процессов икра может попадать в неблагоприятные для ее развития условия, вследствие чего может отмечаться её повышенная смертность. Убыль икры минтая варьируется как по отдельным каньонам Авачинского залива, так и по годам [15]. Соответственно, исследование локальных динамических факторов, влияющих на распределение минтая на ранних этапах развития, является одной из приоритетных задач по выяснению механизмов, влияющих на формирование урожайности поколений этого вида.

Для проверки данной гипотезы необходимо проведение комплексного эксперимента, сочетающего одновременные учащенные гидрологические и ихтиологические исследования. Методическая основа эксперимента должна учитывать специфику работы на континентальном склоне в океане в районе с крайне сложными гидрометеорологическими условиями, позволяя, с одной стороны, охватывать наблюдениями значительные глубины, а с другой — получать детальные сведения об изменчивости гидрофизических полей и планктонных сообществ на небольших пространственно-временных масштабах. Отметим, что используемые в настоящее время в практике промысловой океанографии подходы [6, 16] ориентированы главным образом на слежение за изменчивостью бо́льшего масштаба, чем те, о которых говорилось выше. Изменчивость, связанная с приливом, остается вне поля подобных исследований.

Поэтому цель данной работы описать особенности разработанной методики натурного эксперимента по изучению влияния гидрофизических процессов, обусловленных приливом, на распределение икры минтая и кратко представить предварительные результаты работ в каньонах Авачинского залива, выполненных в апреле 2024 г.

2. Методика натурного эксперимента

Основная задача натурного эксперимента в Авачинском заливе заключалась в сборе гидрологической и ихтиологической информации с использованием стандартных приборов при минимальных затратах судового времени, анализ которой служит как для задач стандартного рыбохозяйственного мониторинга, так и для получения количественных оценок короткопериодной (внутрисуточной) изменчивости вертикальной структуры термохалинных полей и распределения ранних стадий развития минтая в период нереста с привязкой к особенностям приливного цикла. Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja.

Эпицентры размножения минтая в Авачинском заливе расположены в глубоководных каньонах, в т. ч. в так называемом «Северном» и «Центральном» каньонах (см. рис. 1, *a*). В последние 20 лет здесь, по возможности, в течение всего периода размножения в весенние месяцы специалистами КамчатНИРО проводятся работы на мониторинговых станциях, расположенных в вершинах каньонов [6]. Положение этих станций и определило районы проведения натурного эксперимента.

Время работ в области каньонов определялось заранее, как с учетом сроков массового нереста минтая (апрель), так и в предположении значимой роли приливных процессов. Приливная динамика в Авачинском заливе оценивалась по результатам модельных (региональная модель FESOM-с) расчетов на вычислительной сетке высокого пространственного разрешения [17], которые показали ранее хорошую точность при сравнении с данными мареографных наблюдений. Результаты моделирования также обнаружили значимые различия расчетных приливных течений от оценок из глобальных моделей. Соответственно даты выполнения эксперимента в пределах интервала ожидаемого нереста выбирались в период сизигийного прилива, когда влияние приливной динамики на характеристики среды максимально (см. рис. 1, δ).

Сами работы разделялись на четыре этапа. На первом и четвертом этапах выполнялись стандартные (мониторинговые) исследования: профилирование термохалинных параметров, облов ихтиопланктона от 500 м до поверхности и затем послойный облов для горизонтов: 0–25, 25–50, 50–100, 100–200, 200–300, 300–400, 400–500 м. На втором этапе оценивались особенности гидрологической структуры вод по



Рис. 1. Батиметрическая карта Авачинского залива, красной и черной точками указаны положения «Центрального» и «Северного» каньонов с датами проведения натурных экспериментов (*a*); в этих точках — приливные колебания уровня моря по модели FESOM-с [17] в апреле 2024 г. Заштрихованные области соответствуют периодам экспериментов в «Центральном» (1 эксперимент) и «Северном» (2 эксперимент) каньонах (*б*)

Fig. 1. Bathymetric map of Avacha Bay, red and black dots indicate the positions of the "Central" and "Northern" canyons with the dates of in-situ experiments (*a*); tidal sea level heights according to the FESOM-c model [17] are provided at these dotes in April 2024. The shaded areas in Figure 1b correspond to the periods of experiments in the "Central" (1st experiment) and "Northern" (2nd experiment) canyons (*b*)

Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах... Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay...

вертикальному профилю температуры, определялась граница между ХПС и ТПС, а по профилю частоты Вяйсяля-Брента решалась задача Штурма-Лиувилля [18] для определения положения максимумов вертикальных скоростей первой и второй мод внутренней волны и вертикального распределения ранних стадий развития минтая (по послойным обловам определяются горизонты с максимальным количеством икры). На основании полученных оценок выбирались горизонты для учащенных обловов икры. На третьем этапе продолжительностью не менее суток выполнялись учащенные комплексные станции, включающие гидрологические измерения и обловы ихтиопланктона на выбранных горизонтах с дискретностью по времени два часа. Работы производились в одних и тех же координатах для каждого каньона над глубиной 550 м. По результатам этих измерений оценивались внутрисуточная изменчивость положения границы ХПС — ТПС и количества икры на выбранных горизонтах.

Профилирование температуры и солёности производилось СТД-зондом типа СТД-48 (Sea Sun Technology, Германия) с шагом по глубине не менее 0,5 м. Обловы выполнялись ихтиопланктонной конической сетью ИКС-80 со скоростью подъёма 0,5 м/с. Использовался газ № 14. Полученные пробы планктона фиксировались в 4 % растворе формальдегида для последующей камеральной обработки в лабораторных условиях. В лаборатории из общей массы планктона отделялся ихтиопланктон, определялся его видовой состав с акцентом на ранние стадии развития минтая, подсчитывалось количество икринок, определялись стадии развития икры по шкале Д. Блад с соавторами [19]. Стадия 1 по этой шкале при температуре воды 1–2 °С (средняя температура воды, при которой происходит развитие икры в каньонах Авачинского залива) соответствует возрасту икринок примерно 3 ч.

3. Особенности проведения работ

Экспедиционные работы в вершине «Центрального» каньона выполнялись с 12 по 14 апреля, «Северного» — с 27 по 29 апреля 2024 г. с борта НИС МРТК «Инженер Мартынов» (КамчатНИРО). В обоих случаях время экспериментов удалось совместить с периодом максимумов приливов в сизигийно-квадратурном цикле (рис. 1, *б*). Все работы выполнялись согласно описанным выше методикам. В ходе каждого эксперимента сделано по 17 комплексных (гидрологических и ихтиопланктонных) станций. Единственным отклонением от программы работ из-за навигационных предписаний была отмена повторного послойного облова на горизонтах 0–200 м в «Северном» каньоне. Далее рассмотрим преимущественно результаты гидрологических наблюдений, а результаты послойных обловов подробно будут рассмотрены в последующих работах.

В периоды проведения экспериментов погодные условия были сложными. Во время работ в вершине «Центрального» каньона синоптические условия обуславливались малоградиентным барическим полем, сильных ветров не отмечалось. Однако в районе работ наблюдались волны зыби высотой до 0,7 м, приходившие со стороны открытого океана. Во время работ в «Северном» каньоне атмосферные процессы формировались под влиянием приближения крупного циклона. Преобладала пасмурная погода с осадками в виде мокрого снега и дождя. Ветер и волнение постоянно усиливались. К концу работ высота волн достигла 1 м.

Результаты профилирования температуры и солености на первом этапе экспериментов, выполненных в «Центральном» и «Северном» каньонах, представлены на рис. 2.

В «Центральном» каньоне (рис. 2, *a*) у поверхности отмечался тонкий слой прогретых и распресненных вод. Под ним до глубины 320 м залегали относительно холодные воды (ХПС). При этом абсолютный минимум температуры наблюдался в слое 10-20 м и составлял 0,4 °C. Глубже в ХПС наблюдался монотонный рост как температуры (до 1,2 °C), так и солености (до 33,2 psu). Далее следовала область толщиной около 100 м, где градиент температуры возрос в среднем до 2 °C/100 м, а ниже 400 м залегали теплые воды ТПС (выше 3 °C). Модовый анализ (рис. 2, *в*) показал наличие максимума вертикальных скоростей для первой моды внутренних волн на горизонте 320 м. По результатам выполненных 12 апреля послойных обловов, подробное обсуждение которых будет представлено в последующих работах, более двух третей всех икринок находилось в слое выше 300 м, а максимальное количество икры (46,2 %) учтено в горизонте 200–300 м. Поэтому для суточных послойных обловов в рамках третьего этапа эксперимента в «Центральном» каньоне были выбраны горизонты 250–300 и 300–350 м.

В «Северном» каньоне (рис. 2, δ) на поверхности наблюдался более мощный тёплый (около 2 °C) и относительно пресный слой (31,9 psu). Ниже отмечался ХПС с ядром на уровне 100 м и температурой ниже 1 °C. С глубиной температура (как и солёность) в данном слое медленно возрастала, достигая на глубине 400 м около 1 °C (33,1 psu). Далее наблюдался резкий рост температуры и солёности — слой скачка между ХПС и ТПС. Он прослеживался до глубины 420 м. Наиболее ярко граница между ХПС и ТПС была выражена на горизонтах от 400 до 420 м. Ниже температура достигала более 2,5 °C, а соленость — 33,5 psu. Модовый

Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja.



Рис. 2. Вертикальная изменчивость температуры и солености морской воды и частоты плавучести для «Центрального» (*a*) и «Северного» каньонов (*б*) Авачинского залива; собственная функция вертикальной скорости (W) 1 и 2 моды внутренних волн в «Центральном» (*в*) и «Северном» (*г*) каньонах

Fig. 2. Vertical variability of seawater temperature, salinity and buoyancy frequency for the "Central" (a) and "Northern" canyons (b) of Avacha Bay; the vertical velocity eigenfunctions (W) of 1st and 2nd internal waves modes in the "Central" (c) and "Northern" (d) canyons

анализ (рис. 2, *г*) показал наличие максимума вертикальных скоростей для первой моды внутренних волн в районе 400 м. По результатам послойных обловов, выполненных 27 апреля, около 72 % всех икринок минтая было учтено в горизонте 400–500 м. В результате для суточных послойных обловов в рамках третьего этапа эксперимента в «Центральном» каньоне были выбраны горизонты 400–450 и 450–500 м. Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах... Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay...

4. Результаты экспериментов

4.1. Изменчивость гидрологических полей

Представление об изменчивости температуры вод в области «Центрального» каньона в ходе приливного цикла можно получить по данным синхронных наблюдений за температурой и расчетов баротропных приливных течений, представленных на рис. 3. Стоит отметить, что по данным моделирования [17] отдельных приливных гармоник (полусуточной M2 и суточной K1) эллипсы течений были ориентированы преимущественно поперек оси «Центрального» и вдоль оси «Северного» каньонов, а их величина у суточных приливов была в несколько раз больше, чем у полусуточных гармоник. Соответственно расчётный суммарный прилив из 12 составляющих относится к неправильному суточному типу. В период наблюдений общий размах колебаний уровня составил около 1,5 м, а скорости баротропных приливных течений достигали 12,5 см/с. Максимальные скорости течений наблюдались в направлении вдоль материкового склона в фазу отлива по колебаниям уровня. В то же время течения в ходе прилива были на порядок слабее и имели направление на шельф.

Температура вод в течение проведения эксперимента в «Центральном» каньоне в слое ХПС менялась в пределах от 0,4 до 1 °C, а в области ТПС — от 2,8 до 3,6 °C. Наибольший уровень подъема вод ТПС и термоклина, отделяющего ТПС от ХПС, приходился на период максимума скоростей приливных течений, а также при направлении приливного течения на юго-запад, т. е. направленного преимущественно поперек оси каньона. Напротив, заглубление термоклина происходило на минимуме приливных течений. Максимальный скачок температуры между ТПС и ХПС примерно соответствовал глубине залегания изотермы 1,5 °C. Амплитуда вертикального перемещения слоя скачка достигала 50 м. Кроме того, колебания температуры



Рис. 3. Результаты зондирований в рамках эксперимента в «Центральном» каньоне с 12 по 14 апреля 2024 г., совмещённые с ходом приливного уровня (черная линия) и баротропных приливных течений (черные стрелки) по [17]. Вертикальными рядами точек обозначены измерения СTD-зондом

Fig. 3. Results of in situ measurements during the experiment in the "Central" canyon from April 12–14, 2024, combined with the tidal heights (black line) and barotropic tidal currents (black arrows) according to [17]. Vertical rows of points indicate CTD measurements

Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja.

отмечались и в области ядра ХПС, глубина залегания его нижней границы колебалась с амплитудой 20 м. Хотя, как отмечалось выше, уровень изменчивости температуры в этом слое был незначителен и составлял порядка 0,5 °С.

В целом колебания приливного уровня и нижней границы раздела ХПС-ТПС совпадают. Минимальные глубины ее погружения соответствуют максимумам скорости приливного течения, что позволяет предполагать формирование в каньоне вынужденной или захваченной внутренней волны с суточным приливным периодом.

Представление об изменчивости температуры вод в области «Северного» каньона в ходе приливного цикла можно получить по данным синхронных наблюдений за температурой и расчетов характеристик баротропных приливных течений, представленных на рисунке 4. Суммарный прилив здесь так же относится к неправильному суточному типу и по ходу уровня весьма схож с описанным ранее. В период наблюдений общий размах колебаний уровня составил чуть более 1,5 м, а скорости приливных течений достигали 12,5 см/с. Максимальные скорости течений наблюдались также в фазу отлива в направлении вдоль оси каньона. В прилив течения были несколько слабее, чем в отлив, но не такие слабые, как в «Центральном» каньоне. Приливной поток, направленный в сторону берега, по продолжительности был меньше, чем от берега.

Во время проведения работ в «Центральном» каньоне температура на поверхности колебалась в зависимости от времени суток от 2,2 до 1,7 °C. Область ядра ХПС, которая имела температуру менее 0,5 °C, испытывала значительные колебания особенно в части положения нижней границы. Она могла сместится на десятки метров за несколько часов. В целом температура вод в ХПС менялась в пределах от 0,2 до 1,4 °C.



Рис. 4. Результаты зондирований в рамках эксперимента в «Северном» каньоне с 27 по 29 апреля 2024 г., совмещённые с ходом приливного уровня (черная линия) и баротропных приливных течений (черные стрелки) по [17]. Вертикальными рядами точек обозначены измерения СTD-зондом

Fig. 4. Results of in situ measurements during the experiment in the "Northen" canyon from April 27–29, 2024, combined with the tidal heights (black line) and barotropic tidal currents (black arrows) according to [17]. Vertical rows of points indicate CTD measurements

Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах... Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay...

При этом граница между ХПС и ТПС прослеживалась достаточно четко на глубинах около 400 м, и максимальный градиент наблюдался на глубине залегания изотермы 2,5 °C. Эта изотерма испытывала неправильные полусуточные колебания с амплитудой от 20 до 50 м.

В целом прослеживается связь между колебаниями приливных течений и нижней границей слоя вод, ассоциируемых с ядром ХПС. Течения, направленные в сторону шельфа на северо-запад, приводят к увеличению охватываемых ими толщи вод. При юго-западных течениях картина меняется. С небольшой временной задержкой после максимумов течений наблюдалось заглубление границы раздела ХПС-ТПС. Периоды времени, в которые отмечались минимальные по глубине положения термоклина, соответствовали максимумам скорости приливного течения. О механизме происхождения отмеченных колебаний, повторяющихся входе приливного цикла, можно выдвинуть два требующих проверки предположения. Первое заключается в том, что недалеко от точки наблюдений происходит отражение внутренней приливной волны от дна и начинается ее распад. Второе — при смене направления приливного течения распадается внутренний гидравлический скачок, образовавшийся в вершине каньона.

4.2. Изменчивость распределения икры минтая

По результатам работ 12 апреля в «Центральном» каньоне в рамках камеральной обработки было учтено 9714 икринок минтая под 1 м². Все икринки находились на 1–13 стадиях развития, и доминировала 9 стадия (25%). Принимая во внимание, что бо́льшая часть икры находилась на начальных стадиях развития, можно предположить, что эксперимент пришелся на сроки, близкие к пику воспроизводства вида в этом каньоне. По результатам облова, выполненного 27 апреля в «Северном» каньоне, было учтено 5020 икринок минтая под 1 м². В пробах превалировала икра на 6 (22,0%) и 14–17 (48,0%) стадиях развития. Преобладание в уловах икры на более поздних стадиях развития свидетельствует о том, что к моменту эксперимента пик размножения минтая в «Северном» каньоне заканчивался.

Результаты натурного эксперимента по изменчивости во времени общего количества икры минтая и икринок на 1 стадии развития на отдельных горизонтах и колебаний изотерм, соответствующих границе между ХПС–ТПС в «Центральном» и «Северном» каньонах, представлены на рис. 5.

Как можно видеть из рис. 5, a-b, колебания количества выметанной икры в «Центральном» каньоне имеют преимущественно суточную ритмику. Максимальное количество на обоих облавливаемых горизонтах отмечалось в 16:30 13 апреля. В это время наблюдался подъем верхней границы ТПС и чрезвычайно слабые приливные течения. Минимум отмечался за 12 ч до этого при минимальной глубине залегания слоя скачка в условиях перестройки направления течений. Стоит обратить внимание, что повышенный нерест (обилие икры на 1 стадии развития) над границей ХПС отмечался преимущественно в условиях слабых приливных течений и обострения вертикального градиента температуры с 12:30 до 16:30 13 апреля. В условиях интенсификации приливных течений и ослабления вертикальных градиентов температуры количество икры было меньше.

Анализ результатов обловов в «Северном» каньоне (рис. 5, e-e) показал отсутствие ярко выраженных пиков как в предыдущем эксперименте. При этом максимальный объем учтенной икры не соответствовал пику ее воспроизводства. Значительная часть икры облавливалась утром, а максимум икры 1 стадии пришелся на вечернее и ночное время, что требует отдельного рассмотрения. Стоит отметить, что максимальное общее количество икры и икры на 1 стадии развития отмечалось при заглублении ТПС и ослаблении вертикальных градиентов на его границе, что соответствовало перестройке и ослаблении приливных течений. Нерест происходил преимущественно на верхней границе ТПС.

5. Заключение

Вертикальная изменчивость вод и распределения икры в глубоководных каньонах Авачинского залива имеют значительную динамику. Наличие трехслойной структуры вод в весенний период года — характерная особенность данного региона, которая в очередной раз подтвердилась с помощью проведенного высокочастотного профилирования. Оценки температуры выделенных слоев в целом соотносятся с литературными данными [6]: температура ХПС колебалась в пределах 0,5–1 °C, а ТПС — 2,5–3,5 °C, средняя толщина холодного слоя составляла 200 м, а теплого — 100 м. При этом стоит указать на обнаруженные отличия. Так, в «Центральном» каньоне в момент эксперимента толщина ХПС со средней температурой около 0,8 °C составляла 200 м, в то время как в «Северном» — 300 м при средней температуре вод 0,5 °C. Характеристики ТПС также отличались: в «Центральном» каньоне его температура составляла 3,5 °C, а в «Северном» — 2,5 °C. Амплитуда колебания границы раздела ХПС–ТПС по данным наблюдений оставляла около 50 метров и имела выраженный суточный период — в «Центральном» каньоне — и неправильный полусуточный — в «Северном» каньоне.

Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja.



Рис. 5. Количество икры в двух слоях облова и положение изотермы между ХПС и ТПС за период проведения эксперимента: *a* — общего количества икры минтая и 1,5 °С в «Центральном» каньоне; *б* — икры на 1 стадии развития и 1,5 °С в «Центральном» каньоне; *в* — общего количества икры и 2,5 °С в «Северном» каньоне; *е* — икры минтая на 1 стадии развития и 2,5 °С в «Северном» каньоне. Синими и голубыми цифрами на рис. 5, *а* показаны максимальные значения икры на 16:30

Fig. 5. Number of pollock eggs in two layers and isotherm position between cold intermediate layer and warm intermediate layer during the experiment period: a – total number of eggs and 1.5 °C in the "Central" canyon; b – number of eggs at the 1st developmental stage and 1.5 °C in the "Central" canyon; c – total number of eggs and 2.5 °C in the "Northern" canyon; d – number of eggs at the 1st developmental stage and 2.5 °C in the "Northern" canyon; d – number of eggs at the 1st developmental stage and 2.5 °C in the "Northern" canyon. The blue and cyan figures in Fig. 5a show the maximum number of pollock eggs at 16:30

Полученные в рамках экспериментов количественные оценки икры минтая указывают на то, что первый эксперимент пришелся на сроки, близкие к пику воспроизводства вида в этом каньоне, что хорошо согласуется с ранними оценками [16]. При этом второй эксперимент проходил в условиях окончания нереста. Общая комплексная картина результатов проведенных экспериментов показывает, что связь между колебаниями границы холодного и теплого промежуточного слоев под влиянием процессов, обусловленных приливом, и количеством икры в целом прослеживается. В то же время в ряде случаев колебание численности облавливаемой икры происходит с некоторым запаздыванием от колебаний характерной изотермы между слоями. Вероятно, из-за нейтральной плавучести икринок достаточно небольшого импульса для поднятия/опускания в области границы ХПС и ТПС. Кроме того, опускание ихтиопланктонной сети и профилирование проводились не одномоментно, а с небольшой задержкой на 15–30 мин.

По результатам экспериментальных исследований показано, что горизонты основного икрометания в глубоководных каньонах меняются в течение суток под влиянием процессов, обусловленных приливом. Стоит отметить, что ранее наличие колебаний вертикальной структуры вод в каньонах, как и перераспределение икры и личинок минтая, отмечалось по данным отрывочных наблюдений [3, 16, 20], но объяснялось главным образом влиянием вихревых структур. Однако отмеченная в экспериментах приливная ритмика показала, что ее учет так же важен при оценках распределения икры минтая в глубоководных каньонах. Влияние динамических факторов, в том числе прилива, на количество и изменчивость икры минтая уже отмечалось в других районах Мирового океана [21]. Однако текущие экспериментальные результаты отличаются от других постановок высокой частотой облова и профилирования, что ранее для данной области не выполнялось. Отдельно стоит отметить, что колебания границы между ХПС и ТПС

Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах... Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay...

имеют разный период, несмотря на то, что расстояние между двумя глубоководными каньонами составляет всего 30 км. Причины этого требуют отдельного рассмотрения с использованием региональной модели внутренних приливов.

Дальнейшие исследования будут направлены на более глубокий анализ результатов эксперимента с привлечением данных дистанционного зондирования и результатов моделирования внутреннего волнения.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-17-00174, https://rscf.ru/ project/23-17-00174.

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-17-00174, https://rscf.ru/en/proj-ect/23-17-00174/.

Литература

- 1. Колончин К.В., Павлова А.О., Бетин О.И., Яновская Н.В. Минтай как объект российского и мирового промысла // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 5–15. doi:10.36038/2307-3497-2022-189-5-15
- 2. *Антонов Н.П.* Биология и динамика численности восточнокамчатского минтая: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ТИНРО, 1991. 23 с.
- 3. *Буслов А.В.* Минтай восточного побережья Камчатки: современное состояние запасов и рекомендации по рациональной эксплуатации // Известия ТИНРО. 2008. Т. 152. С. 3–17.
- 4. *Буслов А.В., Тепнин О.Б.* Условия нереста и эмбриогенеза минтая *Theragra chalcogramma* (GADIDAE) в глубоководных каньонах тихоокеанского побережья Камчатки // Вопросы ихтиологии. 2002. Т. 42, № 5. С. 617–625.
- 5. *Буслов А.В., Тепнин О.Б., Дубинина А.Ю*. Особенности экологии нереста и эмбриогенеза восточнокамчатского минтая // Известия ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 282–298.
- 6. *Тепнин О.Б.* Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно- камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 66. С. 79–93. doi:10.15853/2072-8212.2022.66.79-93
- 7. *Shanks A.L.* Surface slicks associated with tidally forced internal waves may transport pelagic larvae of benthic invertebrates and fishes shoreward // Marine Ecology Progress Series 13. 1983. P. 311–315. doi:10.3354/meps013311
- 8. *Guida V.G., Valentine P.C., Gallea L.B.* Semidiurnal Temperature Changes Caused by Tidal Front Movements in the Warm Season in Seabed Habitats on the Georges Bank Northern Margin and Their Ecological Implications // Public Library of Science One. 2013. Vol. 8, No. 2. e55273. doi:10.1371/journal.pone.0055273
- Garwood J.C., Musgrave R.C., Lucas A.J. Life in internal waves // Oceanography 2020. Vol. 33, No. 3. P. 38–49. doi:10.5670/oceanog.2020.313
- Phelan P.J., Steinbeck J., Walter R.K. Influence of internal bores on larval fish abundance and community composition // Regional Studies in Marine Science. 2018. Vol. 20. P. 1–12. doi:10.1016/j.rsma.2018.03.010
- Свергун Е.И., Зимин А.В., Коник А.А. Короткопериодные внутренние волны на тихоокеанской акватории полуострова Камчатка и северных Курильских островов по данным спутниковых радиолокационных наблюдений 2017–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 2. С. 251–260. doi:10.21046/2070-7401-2024-21-2-251-260
- 12. *Свергун Е.И., Зимин А.В.* Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе сентябре 2018 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3(213). С. 300–312. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-300-312
- Svergun E.I., Sofina E.V., Zimin A.V., Kruglova K.A. Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel 1 data // Continental Shelf Research. 2023. Vol. 259. 104986. doi:10.1016/j.csr.2023.104986
- 14. *Свергун Е.И., Зимин А.В., Романенков Д.А., Софьина Е.В.* Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах с интенсивной приливной динамикой // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 6. С. 690–705. doi:10.31857/S0002351522060165
- 15. Ильин О.И., Саушкина Д.Я. К оценке продукции икры минтая (Gadus chalcogrammus) в каньонах Авачинского залива // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 64. С. 80–84. doi:10.15853/2072-8212.2022.64.80-84

Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В., Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Svergun E.I., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Varkentin A.I., Tepnin O.B., Saushkina D.Ja.

- Варкентин А.И., Саушкина Д.Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С 105– 119. doi:10.36038/2307-3497-2022-189-105-119
- Романенков Д.А., Софьина Е.В., Родикова А.Е. Моделирование баротропного прилива у юго-восточного побережья п-ва Камчатка с учетом точности глобальных приливных моделей в северо-западном регионе Тихого океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 4. С. 45–62. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4
- 18. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Том 1. М.: МИР, 1986. 396 с.
- 19. *Blood D.M., Matarese A.C., Yoclavich M.M.* Embryonic development of walleye Pollock, *Theragra chalcogramma*, from Shelikof Strait, Gulf of Alaska // Fishery Bulletin. 1994. Vol. 92. P. 207–222.
- 20. Ильин О.И., Сергеева Н.П., Варкентин А.И. Оценка запасов и прогнозирования ОДУ восточно-камчатского минтая (gadus chalcogrammus) на основе преосторожного подхода // Труды ВНИРО. 2014. Т. 151. С. 62–74.
- Hollowed A.B., Wilson C.D., Stabeno P.J., Salo S.A. Effect of ocean conditions on the cross-shelf distribution of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) and capelin (*Mallotus villosus*). // Fisheries Oceanography. 2007. Vol. 16, No. 2. P. 142–154. doi:10.1111/j.1365-2419.2006.00418.x

References

- 1. Kolonchin K.V., Pavlova A.O., Betin O.I., Yanovskaya N.V. Walleye pollock as an object of Russian and world fishery. *Trudy VNIRO*. 2022;189:5–15. doi:10.36038/2307-3497-2022-189-5-15 (in Russian).
- Antonov N.P. Biology and population dynamics of East Kamchatka pollock: Abstract of Cand. of Biological Sciences diss. Vladivostok: TINRO; 1991. 23 p. (in Russian).
- 3. Buslov A.V. Walleye pollock of the eastern Kamchatka coast: modern state of stock and recommendations for rational exploitation. *Izvestiya TINRO*. 2008;152:3–17. (in Russian).
- 4. Buslov A.V., Tepnin O.B. Conditions of spawning and embryogenesis of pollock *Theragra chalcogramma* (GADIDAE) in deep-water canyons of the Pacific coast of Kamchatka. *Voprosy Ichthyologii*. 2002;42(5):617–625 (in Russian).
- 5. Buslov A.V., Tepnin O.B., Dubinina A. Yu. Some features of spawn ecology and embryogenesis of the east Kamchatka walleye pollock. *Izvestiya TINRO*. 2004;138:282–298 (in Russian).
- Tepnin O.B. Variability of hydrological conditions in the spawning grounds of East Kamchatka pollock (*Gadus chalcogrammus*) in 2012–2022. *Issledovaniya Vodnyh Biologicheskih Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj Chasti Tihogo Okeana*. 2022;66:79–93. doi:10.15853/2072-8212.2022.66.79–93 (in Russian).
- 7. Shanks A.L. Surface slicks associated with tidally forced internal waves may transport pelagic larvae of benthic invertebrates and fishes shoreward. Marine Ecology Progress Series 13. 1983;311–315. doi:10.3354/meps013311
- Guida V.G., Valentine P.C., Gallea L.B. Semidiurnal Temperature Changes Caused by Tidal Front Movements in the Warm Season in Seabed Habitats on the Georges Bank Northern Margin and Their Ecological Implications. Public Library of Science One. 2013;8(2): e55273. doi:10.1371/journal.pone.0055273
- Garwood J.C., Musgrave R.C., Lucas A.J. Life in internal waves. Oceanography 2020;33(3):38–49. doi:10.5670/oceanog.2020.313
- Phelan P.J., Steinbeck J., Walter R.K. Influence of internal bores on larval fish abundance and community composition. *Regional Studies in Marine Science*. 2018;20:1–12. doi:10.1016/j.rsma.2018.03.010
- Svergun E.I., Zimin A.V., Konik A.A. Short-period internal waves in the Pacific area of the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands according to 2017–2021 satellite radar observations. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2024;21(2):251–260. doi:10.21046/2070-7401-2024-21-2-251-260 (in Russian).
- Svergun E.I., Zimin A.V. Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Avacha Bay Based on the In Situ and Satellite Observations in August-September, 2018. *Physical Oceanography*. 2020;27(3):278–289. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-278-289
- Svergun E.I., Sofina E.V., Zimin A.V., Kruglova K.A. Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel 1 data. *Continental Shelf Research*. 2023;259:104986. doi:10.1016/j.csr.2023.104986
- Svergun E.I., Zimin A.V., Romanenkov D.A., Sofina E.V. Short-Period Internal Waves in Shelf Regions with Intense Tidal Dynamics. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(6):585–597. doi:10.1134/s0001433822060160
- Ilin O.I., Saushkina D. Ya. On the assessment of pollock (*Gadus chalcogrammus*) roe production in the canyons of Avacha Bay. *Issledovaniya Vodnyh Biologicheskih Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj Chasti Tihogo Okeana*. 2022;64:80–84. doi:10.15853/2072-8212.2022.64.80–84 (in Russian).

Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах... Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay...

- Varkentin A.I., Saushkina D. Ya. On some issues of pollock reproduction in the Pacific waters adjacent to Kamchatka and the northern Kuril Islands in 2013–2022. *Izvestia TINRO*. 2022;189:105–119. doi:10.36038/2307-3497-2022-189-105-119 (in Russian).
- 17. Romanenkov D.A., Sofina E.V., Rodikova A.E. Modeling of barotropic tide off the southeastern coast of the Kamchatka Peninsula in view of the accuracy of global tidal models in the Northwest Pacific Ocean. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023; 16(4):45–62. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4
- 18. Gill A. Dynamics of the atmosphere and ocean. Vol. 1. M.: MIR; 1986. 396 p. (in Russian).
- 19. Blood D.M., Matarese A.C., Yoclavich M.M. Embryonic development of walleye Pollock, *Theragra chalcogramma*, from Shelikof Strait, Gulf of Alaska. *Fishery Bulletin*. 1994;92:207–222.
- 20. Ilin O.I., Sergeeva N.P., Varkentin A.I. East-Kamchatka Walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) Stock and TAC Assessment Based on the Precautionary Approach. *Trudy VNIRO*. 2014;151:62–74 (in Russian).
- Hollowed A.B., Wilson C.D., Stabeno P.J., Salo S.A. Effect of ocean conditions on the cross-shelf distribution of walleye pollock (Theragra chalcogramma) and capelin (Mallotus villosus). *Fisheries Oceanography*. 2007;16(2):142–154. doi:10.1111/j.1365-2419.2006.00418.x

Об авторах

- КОНИК Александр Александрович, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5839-1738, ORCID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, WoS ResearcherID: AAB-7195-2020, e-mail: konikrshu@gmail.com
- ЗИМИН Алексей Вадимович, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, ORCID: 0000-0003-1662-6385, Scopus AuthorID: 55032301400, WoS ResearcherID: C-5885-2014, e-mail: zimin2@mail.ru
- АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5016-2970, ORCID: 0000-0001-6820-0533, Scopus AuthorID: 57188718743, WoS ResearcherID: R-7835-2018, e-mail: oksanam07@list.ru
- СВЕРГУН Егор Игоревич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 3212-7041, ORCID: 0000-0002-9228-5765, Scopus AuthorID: 57195066881, WoS ResearcherID: AAC-7289-2020, e-mail: egor-svergun@yandex.ru
- РОМАНЕНКОВ Дмитрий Анатольевич, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 4872-3349, ORCID: 0009-0005-0374-486X, Scopus AuthorID: 6506855768, WoS ResearcherID: U-8280-2017, e-mail: dmromanenkov@yandex.ru
- СОФЬИНА Екатерина Владимировна, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат физико-математических наук, SPIN-код (РИНЦ): 8904-4934, ORCID: 0000-0001-9206-8253, Scopus AuthorID: 23111468200, WoS ResearcherID: E-3920-2014, e-mail: sofjina k@mail.ru
- ВАРКЕНТИН Александр Иванович, ведущий научный сотрудник КамчатНИРО, кандидат биологических наук, SPIN-код (РИНЦ): 6126-6033, ORCID: 0000-0002-1735-0088, WoS ResearcherID: ADK-2588-2022, e-mail: a.varkentin@kamniro.vniro.ru
- ТЕПНИН Олег Борисович, научный сотрудник КамчатНИРО, SPIN-код (РИНЦ): 4002-1975, ORCID: 0000-0001-9596-4336, WoS ResearcherID: KIL-1378-2024, e-mail: tenpin@ya.ru
- САУШКИНА Дарья Ярославовна, старший специалист КамчатНИРО, SPIN-код (РИНЦ): 4059-2130, ORCID: 0000-0001-8913-0386, Scopus AuthorID: 57219658866, WoS ResearcherID: AAY-8161-2021, e-mail: d_melnik@rambler.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7

УДК 53.03, 001.891.5

© А. А. Родионов, Р. Е. Ванкевич*, А. А. Лобанов, О. В. Глитко, Н. Н. Шпилев, 2024 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия *rvankevich@mail.ru

ТЕРМОСТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ БАССЕЙН САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Статья поступила в редакцию 27.08.2024, после доработки 10.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

Лабораторное моделирование гидрофизических процессов является одним из методов решения научных и практических задач исследования океана. В Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук создан гидрофизический бассейн. Работы в бассейне сопровождаются цифровой копией, позволяющей оптимизировать программы и методики экспериментов. Конструкция бассейна и технологические характеристики позволяют моделировать многослойную стратификацию. В статье содержится описание бассейна, включающее геометрические размеры ($7 \times 2 \times 2, 2$ м — длина, ширина, глубина), аппаратурный измерительный комплекс, метрологическое обеспечение, технологию создания температурной стратификации. Приведены типовые профили 2-х и 3-слойной стратификации. На основе теории подобия оценены допустимые масштабы воспроизводимых натурных гидрофизических процессов. Показано, что созданный гидрофизический бассейн занимает промежуточное место между лотками с солевой стратификацией и большим термостратифицированным бассейном Института прикладной физики РАН. При этом в совокупности с цифровой моделью бассейна появляется возможность воспроизводить гидрологические условия, охватывающие основные типы стратификации озер, морей и океанов, при оптимизации временных и функциональных параметров проведения экспериментов.

Ключевые слова: опытовый бассейн, лабораторное моделирование, гидрофизика, температурная стратификация, измерительный комплекс

UDC 53.03, 001.891.5

© A. A. Rodionov, R. Ye. Vankevich*, A. A. Lobanov, O. V. Glitko, N. N. Shpilev, 2024 Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, 117997, Nakhimovsky pr., 36, Moscow, Russia *rvankevich@mail.ru

THERMALLY STRATIFIED WATER TANK OF ST. PETERSBURG BRANCH OF SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES FOR MODELING HYDROPHYSICAL PROCESSES

Received 27.08.2024, Revised 10.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

Laboratory modeling of hydrophysical processes is one of the methods for solving scientific and practical ocean research tasks. A hydrophysical water tank has been created at the St. Petersburg Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. The work in the tank is supported by a digital model that optimizes experimental programs and methodologies. The design and technological characteristics of the water tank allow for modeling multilayer stratification. This paper describes the tank, including its geometric dimensions (7 m \times 2 m \times 2.2 m - length, width, depth), instrumentation and measurement system, metrological support, and the technology for creating thermal stratification. Typical profiles of two- and three-layer

Ссылка для цитирования: *Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилев Н.Н.* Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 90–99. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7

For citation: Rodionov A.A., Vankevich R. Ye., Lobanov A.A., Glitko O.V., Shpilev N.N. Thermally Stratified Water Tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences for modeling hydrophysical processes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):90–99. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7

Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН... Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences...

stratification are provided. Based on similarity theory, the permissible scales for reproducing natural hydrophysical processes are evaluated. It is shown that the created hydrophysical water tank occupies an intermediate position between salt-stratified tanks and the large thermally stratified tank at the Institute of Applied Physics, RAS. Together with the tank's digital model, it makes it possible to reproduce hydrological conditions covering the main types of stratification in lakes, seas, and oceans, while optimizing the temporal and functional parameters of the experiments.

Keywords: experimental tank, laboratory modeling, hydrophysics, temperature stratification, measuring complex

1. Введение

Исследование гидрофизических процессов в океанах, морях и пресных водоемах имеет научное познавательное значение и практическую важность для решения хозяйственных, экологических и оборонных задач. К настоящему времени сложилась триада методов исследований:

- теоретические, в т. ч. физико-математическое моделирование;

 – физическое моделирование — лабораторный эксперимент различных пространственно-временных масштабов;

- натурные эксперименты.

Наиболее полная и достоверная информация о процессах и явлениях получается при рациональном применении совокупности методов, т. к. каждый из них обладает достоинствами и недостатками.

Теоретическое описание конвективных, волновых, вихревых и турбулентных процессов затруднено в связи с широким спектром движений и сложностью нелинейных взаимодействий. Вместе с тем достижения последних лет в области вычислительной гидродинамики и моделирования крупномасштабных течений связаны с расширением расчетных возможностей современных программных и вычислительных средств. Это позволило создать в последние десятилетия ряд моделей морских и пресных акваторий, представляющих научный и практический интерес. При этом значительный пласт мелкомасштабных процессов в математических моделях остается за пределами доступных вычислительных ресурсов и поэтому параметризируется эмпирическими зависимостями по данным наблюдений. Специальная работа по выполнению натурных измерений волн, вихрей и турбулентных течений для верификации используемых гидродинамических моделей требует ресурсов и времени, а также имеет очевидные ограничения. Получение данных лабораторных измерений для верификации и настройки математических моделей волн является более предпочтительной задачей, чем натурные измерения.

Физическое моделирование остается одним из основных методов решения практических (инженерных) и научных задач. Его высокая эффективность общепризнана как в нашей стране, так и за рубежом. Лабораторные эксперименты, поставленные в соответствии с теорией подобия, позволяют с высокой степенью достоверности получить не только качественные, но и количественные характеристики исследуемых гидрофизических процессов [1, 2].

Более того, в последние десятилетия лабораторные эксперименты вступили в своеобразную эпоху «Возрождения» благодаря технологиям оцифровки, развитию лазеров и оборудования с компьютерным управлением с увеличенной производительностью, что привело к созданию новых инструментов анализа, таких как велосиметрия изображений частиц и лазерно-индуцированная флуоресценция. Это позволяет проводить «неинвазивные» или неконтактные измерения скорости и концентрации в двух и даже трех измерениях [3, 4].

Размеры экспериментальных установок существенно влияют на спектр воспроизводимых в масштабе природных явлений. Так, например, масштабируемые эксперименты с внутренними волнами (BB) проводятся в гидроволновых стратифицированных бассейнах (пространственная задача) и гидроволновых лотках (плоская задача) [5–11]. Чем длиннее бассейн, тем лучше он подходит для наблюдения за полностью развитыми внутренними волнами, которые явно отделены от других типов волн, возникающих из-за несовершенства механизма генерации и переотражения от стенок бассейна. Кроме того, увеличение ширины емкости минимизирует вязкостную диссипацию, возникающую из-за трения о боковые стенки. С другой стороны, чем меньше емкость, тем проще проводить эксперимент, поскольку в ней меньше жидкости для манипулирования в части подготовки стратификации, проведения опытов и эксплуатации установки.

В нашей стране в Институте прикладной физики Российской академии наук в 1990-е гг. создан уникальный большой термостратифицированный бассейн с зеркалом поверхности 20 × 4 м² и глубиной 2 м, позволяющий проводить моделирование натурных процессов для случая двухслойной стратификации [9].

В СПбФ ИО РАН создан и в 2023 г. введен в эксплуатацию стратифицированный гидрофизический бассейн. Конструкция бассейна и технологические характеристики позволяют создавать многослой-

ную стратификацию, охватывающую основные типы гидрологических условий озёр, морей и океанов. В целях повышения эффективности исследований создана цифровая копия бассейна, на основе которой оптимизируются программы и методы экспериментов, а также могут быть получены данные для совершенствования гидрофизических численных моделей [12, 13]. Благодаря сочетанию вычислительных технологий, расширению диапазона создаваемой стратификации и наличию информационно-измерительного комплекса появляются дополнительные возможности для изучения в лабораторных условиях гидрофизических процессов. При корректной постановке эксперимента физическое моделирование может дать достаточно полную качественную картину явлений, а при соответствующем обосновании и известную количественную оценку.

2. Описание бассейна

Геометрические характеристики бассейна: длина — 7 м, ширина — 2 м, глубина — 2,2 м, расчетная площадь зеркала воды — 14 м², объем — 31 м³. Изображение бассейна приведено на рис. 1.

Создание и поддержание вертикального изменения температуры в объеме бассейна для моделирования натурной стратификации воды по плотности осуществляется системой тепло- и холодоснабжения. Система работает по типу теплового насоса: забирая тепло с нижнего контура (охлаждения), перебрасывает его на верхний контур (нагрев). С этой целью в его объеме размещены теплообменные поверхности, набираемые из гибкой гофрированной нержавеющей трубы. Объем бассейна разделяется на три равные зоны по высоте. В каждой зоне предусматривается установка теплообменников с возможностью их подключения к «горячему» или «холодному» контурам. Источником теплоснабжения и холодоснабжения для теплообменников бассейна является водоохлаждаемая холодильная машина, установленная в техническом помещении. Холодильная установка включает чиллер с водяным охлаждением конденсатора NED NBH 128-F и драйкулер, который имеет следующие характеристики: холодопроизводительность — 139 кВт, теплопроизводительность — 173 кВт, количество компрессоров — 4 шт., количество холодильных контуров — 2 шт., количество ступеней производительности — 4 шт. Греющие теплообменники подключаются к конденсаторному контуру холодильной машины, охлаждающие — к испарительному. Сброс избыточного тепла от конденсатора холодильной машины, не используемого для нагрева верхнего объема бассейна, осуществляется драйкулером.



Рис. 1. Гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН. Схема измерительной аппаратуры и вспомогательных средств изображена на рис. 2. Схема холодильной установки приведена на рис. 3

Fig. 1. Hydrophysical water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. The diagram of the measuring equipment and auxiliary tools is shown in Fig. 2. The diagram of the refrigeration system is shown in Fig. 3

Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН... Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences...



Рис. 2. Схема гидрофизического бассейна и его оборудования: *а* — вид с боковой стороны бассейна; *б* — вид с торцевой стороны: 1 — волнопродуктор плунжерного типа, 2 — тележка с 3-осевым координатным устройством, 3 — измерительная штанга координатного устройства, 4 — подводные прожекторы, 5 — подводная видеокамера, 6 — буксируемое тело на протяжном устройстве, 7 — генератор вихревых колец, 8 — вертикальное зондирующее устройство, 9 — подводный дрон, 10 — тепловой контур, 11 — горизонтальная температурная линия

Fig. 2. Diagram of the hydrophysical water tank and its equipment: a — Side view of the water tank; b — End view; 1 — Plungertype wave generator, 2 — Cart with 3-axis coordinate device, 3 — Measuring rod of the coordinate device, 4 — Underwater spotlights, 5 — Underwater video camera, 6 — Towed body on the towing device, 7 — Vortex ring generator, 8 — Vertical probing device, 9 — Underwater drone, 10 — Thermal circuit, 11 — Horizontal temperature line



Рис. 3. Схема холодильной установки гидрофизического бассейна

Fig. 3. Diagram of the refrigeration system of the hydrophysical water tank

Управление пуском/остановкой чиллера предусматривается дистанционно с пультовой лабораторного комплекса, и в автоматическом по достижению целевой температуры слоев воды бассейна. По сравнению с подходом, при котором различные растворы солей используется для создания стабильно стратифицированного слоя, применяемый метод имеет три основных преимущества. Во-первых, образовавшаяся стратификация может быть ближе к таковой в океане, поскольку наибольшее влияние на изменение плотности в верхних слоях океана оказывает температура, а не соленость. Во-вторых, как только установится устойчивая стратификация, появляется возможность проводить серийные измерения волнового поля в любое время без необходимости заново воспроизводить стратификацию после каждого эксперимента. В-третьих, эксплуатация крупного бассейна с плотностной/соленостной стратификацией осложнена вопросами стойкости оборудования и невозможностью прямого сброса в общегородскую канализацию.

При оборудовании бассейна особое внимание уделено измерительным средствам, включающим штатную вертикальную измерительную штангу, вертикальное зондирующее устройство и горизонтальную температурную линию.

Вертикальная измерительная штанга с датчиками температуры закреплена на вертикальной каретке координатного устройства. Координатное устройство позволяет измерять температурный профиль в любой точке бассейна путем перемещения измерительной штанги в трех ортогональных направлениях за исключением слепых зон, обусловленных ограничением его конструкции. В качестве датчиков температуры на штатной измерительной вертикальной штанге используются 30 термометров сопротивления Pt1000 класса точности B, заключенных в защитные гильзы длиной 50 мм и диаметром 6 мм и выполненных по стандарту IP68. Их аналоговый сигнал преобразуется в интерфейс токовой петли с помощью нормирующего преобразователя в диапазоне от 0 до +50 °C. Далее сигнал оцифровывается с помощью промышленного модуля ввода-вывода Segnetics FMR — 1021-10-4.

Вертикальное зондирующее устройство представляет собой станину из алюминиевого конструкционного профиля и закрепленной на ней рельсовой направляющей. На каретке рельсовой направляющей установлен измерительный шуп длиной 900 мм, который способен перемещаться вдоль вертикальной оси с помощью ременного привода, управляемого шаговым двигателем. В качестве чувствительного элемента измерительного щупа используется термистор в SMD исполнении NCP03XH103F05RL (Murata) номиналом 10 кОм и размерами 0,6 × 0,3 мм. Для исключения влияния паразитных эффектов, связанных с обтеканием тела щупа, термистор вынесен ортогонально его оси на 15 мм. Старение датчика не исследовалось, поскольку данный тип датчика имеет малый температурный дрейф [13].

Горизонтальная температурная линия представляет собой набор из 20 измерительных щупов длиной 500 мм, которые вертикально закреплены на алюминиевом профиле с шагом в 89,5 мм. В качестве чувствительного элемента используется термистор в выводном исполнении, покрытый эпоксидной смолой номиналом 10 кОм и размерами 4 × 1,5 мм.

Метрологическое обеспечение измерительной аппаратуры было выполнено на основе эталонного термометра 3-го разряда LTA-Э и калибровочной ванны. Термометр LTA — Э имеет диапазон измерений от -50 до +200 °C и основную погрешность измерений в $\pm 0,02$ °C. Калибровочная ванна имеет диапазон измерений от 0 до +40 °C, объем — 15 л, скорость циркуляции — 12 л/мин и стабильность поддержания температуры в течение 30 мин $\pm 0,0055$ °C.

Калибровка выполнялась методом сличения. После выполнения калибровки для всех средств измерений, погрешности составляют:

- для вертикальной измерительной штанги ± 0.5 °C,
- -для вертикального зондирующего устройства ± 0.02 °C,
- для горизонтальной температурной линии ± 0.5 °C.

Для каждого средства измерения была измерена постоянная времени путём создания резкого скачкообразного изменения температуры. Постоянная времени вычисляется по формуле:

$$\theta = \theta_1 + \left(\theta_2 - \theta_1\right) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right),\tag{1}$$

где θ₁ — температура в первой среде, θ₂ — температура во второй среде, *t* — текущее время, τ — постоянная времени, θ — текущие показания датчика.

После выполнения расчётов для всех средств измерений постоянные времени составили:

- для вертикальной измерительной штанги 8 с;
- для вертикального зондирующего устройства 137 мс;
- для горизонтальной температурной линии 1 с.

Кроме измерительного оборудования бассейн оснащён вспомогательным оборудованием. Для генерации волн (как поверхностных, так и внутренних) бассейн оснащён волнопродуктором плунжерного типа с возможностью изменения глубины погружения, амплитуды и скорости перемещения и заменой ос-

Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН... Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences...

циллирующего тела (рис. 2). В дополнение к координатному устройству бассейн оборудован протяжным устройством для протаскивания моделей с возможностью изменять глубину и скорость протяжки. Для видеофиксации динамических процессов используются экшн-камеры в гермобоксах в паре с подводными прожекторами. Для имитации самодвижущейся модели может быть использован подводный дрон. Также имеется генератор тороидальных вихревых структур.

Точное задание и поддержание термической стратификации в бассейне обеспечивается тонкой настройкой режимов работы холодильного оборудования с использованием цифровой модели бассейна.

На рис. 4 и 5 приведены примеры воспроизведенных опытным путем типовых профилей температуры двух- и трехслойной стратификации.

Для сравнения на рис. 4 (оранжевая линия) приведен типовой профиль температуры большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН [9]. Преимуществом бассейна СПбФ ИО РАН по сравнению с бассейном ИПФ РАН является более тонкая настройка стратификации, а также более высокая скорость ее установки и относительная простота поддержания.

3. Допустимые масштабы воспроизводимых процессов

Под физическим моделированием в бассейне понимается воспроизведение на экспериментальной установке параметров исследуемых физических процессов как природных, так и антропогенных (техногенных). Сложность при проведении модельного эксперимента в бассейне заключается в создании таких условий, при которых полученные результаты можно было бы перенести на натурные акватории, используя масштабные коэффициенты. Масштабные коэффициенты определяются на основании теории подобия.

Рис. 4. Типовые двухслойные профили температуры (по оси X — температура, °C; по оси Y — глубина, м): синий — гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН, время установления стратификации 7,5 ч. Максимальный градиент: 32,5 °C/см; оранжевый — большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН, время установления стратификации 12 ч. Максимальный градиент: 17,5 °C/см

Fig. 4. Typical two-layer temperature profiles (X-axis – temperature in degrees Celsius, Y-axis – depth in meters): blue – hydrophysical water tank of the St. Petersburg Branch of the Institute of Oceanology RAS, stratification establishment time 7.5 hours. Maximum gradient: 32.5 °C/cm; orange – large thermally stratified water tank of the Institute of Applied Physics RAS, stratification establishment

time 12 hours. Maximum gradient: 17.5 °C/cm



Рис. 5. Примеры трехслойной стратификации (гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН): по оси X — температура, °С; по оси Y — глубина, м

Fig. 5. Examples of three-layer stratification (hydrophysical water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology RAS), X-axis — temperature in degrees Celsius, Y-axis — depth in meters

Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилев Н.Н. Rodionov A.A., Vankevich R.Ye., Lobanov A.A., Glitko O.V., Shpilev N.N.

Согласно общим положениям теории подобия при экспериментальных исследованиях требуется соблюдение динамического подобия (по силам) модели и натурного объекта, а также геометрического (по размерам) и кинематического (по скоростям) подобий. Считается, что эти три условия подобия являются необходимыми и достаточными [14]. Чаще всего при лабораторном моделировании удается в определенной степени соблюсти динамическое подобие без соблюдения геометрического и кинематического подобия.

Из уравнения сохранения количества движения (уравнения Новье-Стокса для неустановившихся течений вязкой однородной несжимаемой жидкости) следует, что для модели и натуры должны сохраняться числа Струхаля (Sh), Фруда (Fr), Эйлера (Eu), Рейнольдса (\Re) [15]:

$$Sh_{H} = Sh_{M} или \frac{L_{H}}{\upsilon_{H} \cdot T_{H}} = \frac{L_{M}}{\upsilon_{M} \cdot T_{M}};$$

$$Fr_{H} = Fr_{M} или \frac{\upsilon_{H}}{\sqrt{g \cdot L_{H}}} = \frac{\upsilon_{M}}{\sqrt{g \cdot L_{M}}};$$

$$Eu_{H} = Eu_{M} или \frac{2 \cdot P_{H}}{\rho_{H} \cdot \upsilon_{H}^{2}} = \frac{2 \cdot P_{M}}{\rho_{M} \cdot \upsilon_{M}^{2}};$$

$$\Re_{H} = \Re_{M} или \frac{\upsilon_{H} \cdot L_{H}}{\upsilon_{H}} = \frac{\upsilon_{M} \cdot L_{M}}{\upsilon_{M}},$$
(2)

где L, υ , T, P, ρ — характерные значения геометрических размеров, скорости, периода нестационарности, давления, плотности среды; g, ν — ускорение свободного падения и кинематическая вязкость; индексы м и н относятся к модели и натурным условиям.

Число Струхаля характеризует инерционные гидродинамические силы при нестационарном движении жидкости; число Фруда характеризует отношение сил инерции к силе тяжести; число Эйлера — отношение силы гидродинамического давления к силе инерции, а число Рейнольдса — отношение силы инерции к силе вязкости.

Критерий Эйлера играет большую роль при моделировании явлений, связанных с кавитацией, например, при изучении кавитации у гребных винтов. Если движение тела не сопровождается возникновением кавитации, то при соблюдении критериев подобия Fr, Re равенство чисел E_u для модели и натуры обеспечивается автоматически.

Влияние числа Струхаля при установившемся течении будет несущественным, однако при рассмотрении представляющих большой интерес нестационарных движений в жидкости данный критерий обязателен, в том числе при изучении на модели сопротивления воды неустановившемуся движению тела с ускорением при разгоне или торможении.

Моделирование по числу Рейнольдса в большинстве случаев является технически неосуществимым, т. к. требует, чтобы скорость модели оказалась значительно больше скорости в натурных условиях.

Для рассматриваемого гидрофизического бассейна, основное назначение которого состоит в моделировании внутренних волн, вихрей и турбулентных течений, вызванных природными и техногенными причинами, в том числе движением/обтеканием препятствий в стратифицированной жидкости, естественно, рассматривать пространственно-временные стадии процессов, на которых влияние чисел Рейнольдса несущественно. К примеру, в работах Спеддинга и др. [16] было показано, что уже в диапазоне 5000–33000 число Рейнольдса оказывает лишь слабое влияние на дальний след в стратифицированной среде.

При рассмотрении внутренних течений в стратифицированной по плотности жидкости к уравнению сохранения количества движения добавляется уравнение неразрывности и выводится так называемое денсиометрическое или внутреннее число Фруда.

В случае непрерывной стратификации оно определяется как

$$Fr_i = \frac{U}{NL},$$
(3)

где $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$ — частота Брента-Вяйсяля, *z* — вертикальная координата, — средняя скорость потока.

При моделировании стратификации [9] сохраняются неизменными абсолютные перепады плотности и температуры, свойственные натурным движениям. Для верхнего слоя океана, где стратификация плотности обусловлена в основном изменением температуры, масштабное моделирование означает вертикальное сжатие распределения температуры в К_θ раз при сохранении полного перепада температуры Δθ, свойствен-

Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН... Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences...

ного океану с поправкой на изменение солености. В частности, сохраняются в сопоставимых условиях амплитуды колебаний плотности во внутренних волнах, хотя сами волны переносятся в более высокочастотную область временных и пространственных масштабов. Чтобы обеспечить на модели и в натурных условиях равенство чисел Фруда масштаб периода волны будет равен:

$$K_T = \frac{T_{\rm M}}{T_{\rm H}} \sqrt{K\theta}$$
 (K_{θ} — геометрический масштаб).

При наличии в потоке сдвига скорости по вертикали в дополнение к (2) вводится также градиентное число Ричардсона:

$$R_{i} = \frac{-g\left(\frac{\partial\rho}{\partial z}\right)}{\rho\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{2}}.$$

Исходя из теории подобия в гидрофизическом бассейне могут моделироваться натурные процессы и явления с коэффициентом геометрического подобия K_L порядка 100, и коэффициентами подобия по скорости течений (движения объектов), сжатия стратификации порядка 10. Соответственно в бассейне могут моделироваться натурные тонкоструктурные, вихревые и волновые процессы с вертикальными масштабами от сантиметров до десятков метров со скоростями до единиц метров в секунду и вертикальными градиентами плотности, характерными для сезонного и основного пикноклина, а также эффекты объекания тел стратифицированной жидкостью с диаметром до 10 м в диапазоне скоростей до 10 м/с.

4. Заключение

Гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН занимает промежуточное место между стратифицированными лотками с солевой стратификацией и большим термостратифицированным бассейном ИПФ РАН. Геометрические и физико-технические характеристики бассейна, а также его цифровая копия [13] в совокупности позволяют оптимально подходить к подготовке и проведению эксперимента, моделировать основные типы стратификации морских и пресных акваторий.

Известные из научной литературы результаты лабораторных экспериментов связаны в основном с исследованием внутренних волн в жидкости с линейной или двухслойной стратификацией, изучением течений около плохообтекаемых тел — сфер, цилиндров, полусфер [18], плоских пластин [19] и тонких вертикальных барьеров [20]. В нескольких работах рассматривается движение тел в термоклине, по характеристикам приближенном к океану [10, 11]. При этом чаще изучается волновая система вокруг тел, движущихся стационарно в термоклине. Недостаточно внимания уделяется исследованиям волновых систем при нестационарном движении тел.

В гидрофизическом бассейне предполагается проведение исследований в области гидродинамики природных процессов и воздействия техногенных факторов на среду морских и пресных водоемов с моделированием реальной стратификации и приоритетностью изучения эффектов нестационарности, вихревых движений, волновихревых взаимодействий. Большой интерес представляет лабораторное моделирование взаимодействия различных видов течений (внутренних волн и регулярных слоистых структур конвективных течений, вихрей и волн, которое может быть выполнено с использованием современных зондовых и дистанционных оптических и акустических методов исследования.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0029.

Funding

The work was performed under the State assignment FMWE-2024-0029.

Литература

1. *Тлявлина Г.В.* Лабораторные и натурные исследования в обеспечение развития нормативной базы и безопасности транспортных сооружений в условиях волнового воздействия // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 4. doi:10.15862/10SATS422

- 2. *Чашечкин Ю.Д.* Лабораторное моделирование свободных стратифицированных течений // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сборник научных трудов / Под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Том 2. 220 с. (с. 225–444).
- 3. Арройо М.П., Хинш К.Д. Последние разработки PIV в области 3D-измерений. Springer, 2008. С. 127–154.
- 4. Либерзон А., Гурка Р., Хецрони Г. XPIV–Многоплоскостная стереоскопическая велосиметрия изображений частиц // Experiments in Fluids. 2004. Vol. 36. P. 355–362. doi:10.1007/s00348-003-0731-9
- 5. *Schooley A.H., Stewart R.W.* Experiments with selfpropelled body submerged in a fluid with a vertical density gradient // Journal of Fluid Mechanics. 1963. Vol. 15, Iss. 1. P. 83–96. doi:10.1017/S0022112063000070
- Barr D.I.H., Hassan A.M.M. Densimetric exchange flow in rectangular channels II. Some observations of the structure of lock exchange flow Courants de densité en Canal Rectangulaire // La Houille Blanche. 1963. Vol. 49(7). P. 757–766. doi:10.1051/lhb/1963053
- 7. *Maxworthy T*. On the formation of nonlinear internal waves from the gravitational collapse of mixed regions in two and three dimensions // Journal of Fluid Mechanics. 1980. Vol. 96. P. 47–64. doi:10.1017/S0022112080002017
- 8. *Stockhausen P.J.*, *Clark C.B.* et al. Three-dimentional wakes in density-stratified liquids. MIT, USA, Hydrodynamic Lab. Rept. 1966, T66–6. N 93. 105 p.
- Арабаджи В.В., Богатырев С.Д., Баханов В.В., Казаков В.И., Коротков Д.П., Серин Б.В., Таланов В.И., Шишкина О.Д. Установка для моделирования гидрофизических процессов в верхнем слое океана (большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // Приповерхностный слой океана: физические процессы и дистанционное зондирование. ИПФ РАН: Н. Новгород, 1999. Т. 2. С. 231–251.
- 10. Шишкина О.Д. Экспериментальное исследование генерации внутренних волн вертикальным цилиндром в приповерхностном пикноклине // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2002. N6. C. 94–99.
- 11. *Баханов В.В., Власов С.Н., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Копосова Е.В., Шишкина О.Д.* Моделирование внутренних и поверхностных волн реального океана в Большом термостратифицированном опытовом бассейне ИПФ РАН // Известия ВУЗОВ. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 7. С. 537–554.
- 12. *Чашечкин Ю.Д.* Дифференциальная механика жидкостей: согласованные аналитические, численные и лабораторные модели стратифицированных течений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: естественные науки. 2014. № 6(57). С. 67–95.
- 13. Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Лобанов А.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н. Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 100–108. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8.
- Kulkarni A., Patrascu M., van de Vijver Y. et al, Investigation of Long-Term Drift of NTC Temperature Sensors with less than 1 mK Uncertainty // IEEE24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Brazil, 2015. P. 150–155. doi:10.1109/ISIE.2015.7281460
- 15. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд., доп. Москва: Наука, 1987. 430 с.
- 16. *Терлецкая Е.В., Мадерич В.С., Бровченко И.А., Талипова Т.Г.* Неполная автомодельность внутренних волн второй моды в слое раздела // Прикладна гідромеханіка. 2013. Т. 9 (82), № 3. С. 1–11.
- 17. *Spedding G*. Wake Signature Detection // Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. Vol. 46. P. 273–302. doi:10.1146/annurev-fluid-011212-140747
- Brown S.N. Slow viscous flow of a stratified fluid past a finite flat plate // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1968. Vol. 306, Iss. 1485. P. 239–256. doi:10.1098/rspa.1968.0148
- 19. *Sutherland B.R., Linden P.F.* Internal wave excitation from stratified flow over a thin barrier // Journal of FluidMechanics. 1998. Vol. 377. P. 223–252. doi:10.1017/S0022112098003048
- Chashechkin Y.D., Mitkin V.V. Experimental study of a fine structure of 2D wakes and mixing past an obstaclein a continuously stratified fluid // Dynamics of Atmosphere and Oceans 2001. Vol. 34. P. 165–187. doi:10.1016/S0377-0265(01)00066-5

References

- 1. Tlyavlina G.V. Laboratory and field studies to ensure the regulatory framework development and the transport facilities' safety in the wave effect conditions. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;9:4. doi:10.15862/10SATS422 (in Russian).
- Chashechkin Yu.D. Laboratory modeling of free stratified currents. *Pripoverkhnostnyy Sloy Okeana. Fizicheskiye Protsessy i Distantsionnoye Zondirovaniye: Sbornik nauchnykh trudov /* Ed. Ye.N. Pelinovsky, V.I. Talanov. N. Novgorod: IPF RAN; 1999. Vol. 2. 220 p. (p. 225–444) (in Russian).
- 3. Arroyo M.P., Hinsch, K.D. Recent Developments of PIV towards 3D Measurements. Particle Image Velocimetry. *Topics in Applied Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007. Vol. 112. doi:10.1007/978-3-540-73528-1_7

Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН... Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences...

- 4. Liberzon A., Gurka R., Hetsroni G. XPIV–Multi-plane stereoscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. 2004:36:355–362. doi:10.1007/s00348-003-0731-9
- 5. Schooley A.H., Stewart R.W. Experiments with selfpropelled body submerged in a fluid with a vertical density gradient. *Journal of Fluid Mechanics*. 1963;15(1):83–96. doi:10.1017/S0022112063000070
- Barr D.I.N., Hassan A.M.M. Densimetric exchange flow in rectangular channels. *La Hoille Blanche*. 1963;49(7):757– 766. doi:10.1051/lhb/1963053
- 7. Maxworthy T. On the formation of nonlinear internal waves from the gravitational collapse of mixed regions in two and three dimentions. *Journal of Fluid Mechanics*. 1980;96:47. doi:10.1017/S0022112080002017
- Stockhausen P.J., Clark C.B. et al. Three-dimentional wakes in density-stratified liquids. MIT, USA, *Hydrodynamic Lab. Rept.* 1966, T66–6. N 93. 105 p.
- Arabadzhi V.V., Bogatyrev S.D., Bakhanov V.V., Kazakov V.I., Korotkov D.P., Serin B.V., Talanov V.I., Shishkina O.D. Installation for modeling hydrophysical processes in the upper layer of the ocean (large thermostratified water tank of the Institute of Applied Physics RAS). *Pripoverkhnostnyy Sloy Okeana: Fizicheskiye Protsessy i Distantsionnoye Zondirovaniye*. N. Novgorod: IPF RAN; 1999. Vol. 2. P. 231–251. (in Russian)
- 10. Shishkina O.D. Experimental investigation of the generation of internal waves by a vertical cylinder in a near-surface pycnocline. *Fluid Dynamics*. 2002;37(6):931–938. doi:10.1023/a:1022356531179
- Bakhanov V.V., Vlasov S.N., Kazakov V.I. et al. Modelling of Internal and Surface Waves of the Real Ocean in the Large Thermostratified Experimental Tank at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003;46:486–501. doi:10.1023/B: RAQE.0000019865.97760.2c
- 12. Chashechkin Yu.D. Fluid mechanics: consistent analytical, numerical and laboratory models of stratified flows. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2014;6:67–95 (in Russian).
- Vankevich R. Ye., Rodionov A.A., Lobanov A.A., Filin K.B., Shpilev N.N. Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):100–108. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8
- Kulkarni A., Patrascu M., van de Vijver Y. et al. Investigation of Long-Term Drift of NTC Temperature Sensors with less than 1 mK Uncertainty. IEEE24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Brazil;2015. P. 150–155. doi:10.1109/ISIE.2015.7281460
- 15. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. 10th ed., add. Moskva: Nauka; 1987. 430 p. (in Russian).
- 16. Terletskaya E.V., Maderich V.S., Brovchenko I.A., Talipova T.G. Incomplete self-similarity of internal waves of the second mode in the interface layer. *Applied Hydromechanics*. 2013;9(82)3:1–11 (In Russian).
- 17. Spedding G. Wake Signature Detection. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2014;46:273–302. doi:10.1146/annurev-fluid-011212-140747
- 18. Brown S.N. Slow viscous flow of a stratified fluid past a finite flat plate. *Proceedings of the Royal Society of London*. *Series A*. 1968;306(1485):239–256. doi:10.1098/rspa.1968.0148
- 19. Sutherland B.R, Linden P.F. Internal wave excitation from stratified flow over a thin barrier. *Journal of FluidMechanics*. 1998;377:223–252. doi:10.1017/S0022112098003048
- 20. Chashechkin Y.D., Mitkin V.V. Experimental study of a fine structure of 2D wakes and mixing past an obstaclein a continuously stratified fluid. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*. 2001;34:165–187. doi:10.1016/S0377-0265(01)00066-5

Об авторах

- РОДИОНОВ Анатолий Александрович, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» СПбФ ИО РАН, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru
- ВАНКЕВИЧ Роман Евгеньевич, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-3891-3396, Scopus AuthorID: 25642198100, WoS ResearcherID: M-3215-2013, SPIN-код: 2295-6136, e-mail: rvankevich@mail.ru
- ЛОБАНОВ Андрей Александрович, директор СПбФ ИО РАН, доктор технических наук, ORCID: 0009-0006-9064-1849, SPIN-код (РИНЦ): 1030-8262, e-mail: lobanov.aa@spb.ocean.ru
- ГЛИТКО Олег Викторович, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0009-0005-2313-2326. e-mail: glitko_kisin@mail.ru
- Шпилев Николай Николаевич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125, ORCID: 0000-0003-3638-3253, e-mail: nn.shpilev@gmail.com

DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8

УДК 532.51; 532.54

© *Р. Е. Ванкевич**, *А. А. Родионов*, *А. А. Лобанов*, *К. Б. Филин*, *Н. Н. Шпилев*, 2024 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36 *rvankevich@mail.ru

ЦИФРОВАЯ КОПИЯ ТЕРМОСТРАТИФИЦИРОВАННОГО БАССЕЙНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА РАН

Статья поступила в редакцию 06.10.2024, после доработки 10.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

Статья посвящена разработке цифровой модели большого термостратифицированного бассейна для гидрофизических исследований. При построении моделей использованы современные наработки в области вычислительной гидродинамики и высокопроизводительных вычислений для оптимизации и частичного замещения дорогостоящих физических экспериментов. Задание и поддержание термической стратификации в бассейне обеспечивается тонкой настройкой режимов работы теплового/холодильного оборудования на основе использования разработанной цифровой модели бассейна. Цифровая копия рассматривается в первую очередь как вспомогательный инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты. В качестве критериев оптимизации могут быть рассмотрены время либо минимизация затрат на установление заданной стратификации в бассейне. В то же время совершенствование численной модели по данным физических экспериментов позволит экстраполировать верифицированные лабораторным путем зависимости для описания режимов, характерных для натурных процессов в океане, но сложно реализуемых при масштабном физическом моделировании. Цифровая копия служит конструктивным дополнением к термостратифицированному бассейну, поскольку позволяет рационально построить методику эксперимента, достичь желаемого результата при сокращении временных и материальных ресурсов.

Ключевые слова: опытовый бассейн, лабораторное моделирование, цифровая копия, численная модель, негидростатическая динамика

UDC 532.51; 532.54

© *R. Ye. Vankevich**, *A. A. Rodionov, A. A. Lobanov, K. B. Filin, N. N. Shpilev*, 2024 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36 *rvankevich@mail.ru

DIGITAL COPY OF THE THERMALLY STRATIFIED WATER TANK OF ST. PETERSBURG BRANCH OF SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

Received 06.10.2024, Revised 10.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

This paper focuses on the development of a digital model for a large thermally stratified water tank intended for hydro-physical studies. The model construction incorporates modern advances in computational hydrodynamics and high-performance computing to optimize and partially replace costly physical experiments. The precise establishment and maintenance of thermal stratification within the tank are achieved through fine-tuning the operation of heating/cooling systems, based on the use of the developed digital model. The digital copy is primarily viewed as a supplementary tool aimed at optimizing serial experiments. Simultaneously, the refinement of the numerical model through physical experimental data enables the extrapolation of laboratory-verified rela-

Ссылка для цитирования: Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Лобанов А.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н. Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 100–108. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8 For citation: Vankevich R. Ye., Rodionov A.A., Lobanov A.A., Filin K.B., Shpilev N.N. Digital Copy of the Thermally Stratified Water Tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2024;17(4):100–108. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8

Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала института океанологии... Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology...

tionships to describe regimes characteristic of natural oceanic processes that are challenging to replicate in large-scale physical modeling. The digital copy serves as a constructive complement to the thermally stratified water tank, as it allows for a more efficient experimental methodology, achieving desired results while reducing both time and material costs.

Keywords: laboratory water tank, laboratory modeling, digital copy, numerical modeling, nonhydrostatic dynamics

1. Введение

Важным методом изучения процессов в океане является их физическое моделирование в бассейнах достаточно больших размеров с контролируемыми и воспроизводимыми гидрофизическими условиями [1, 2]. В литературе отмечается, что в таких системах сложно создавать резкие скачки плотности и точно воспроизводить вертикальный профиль температуры в масштабах 1:100 и более в меняющихся условиях эксперимента [2]. Ключевой фактор успешности экспериментальных исследований — контролируемость и воспроизводимость условий эксперимента в серии испытаний. Большой термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СПбФ ИО РАН) отличается расширенными возможностями по созданию сложных термических стратификаций, приближенных к наблюдаемым в морях и океанах [1]. Вместе с тем эмпирический подбор режимов установления и поддержания заданной стратификации в бассейне трудоемок, затратен по времени и ресурсам, а также не всегда позволяет достичь требуемого результата. Для решения задачи точной подстройки режимов теплового оборудования и оптимизации эксперимента в СПбФ ИО РАН создается цифровая копия бассейна.

Цифровая копия бассейна — модульная платформа для организации взаимодействия различных гидрофизических моделей для изучения волновихревых, турбулентных и конвективных процессов в стратифицированной среде бассейна.

Развитие технологий цифровых копий объекта часто рассматривают как альтернативу модельным или натурным испытаниям во многих областях. В данной работе цифровая копия рассматривается в первую очередь как инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты и, как рациональная опция, позволяющая экстраполировать верифицированные опытном путем зависимости для режимов, сложно поддающихся физическому моделированию (например, высокие числа Рейнольдса и т. п.).

В данной статье рассматривается задача установления различных типов стратификации в бассейне за счет бокового прогрева/охлаждения. После включения тепловой/холодильной машины в бассейне в результате свободной конвекции возникают вихревые движения с различным средним направлением циркуляции жидкости выше и ниже области температурного скачка. Точное установление заданного температурного режима требует детального моделирования конвективных процессов в бассейне [1].

Конвективные течения вязких несжимаемых жидкостей — классический раздел гидродинамики. Численное моделирование конвективных процессов является достаточно сложной задачей, решению которой на основе уравнений Навье-Стокса посвящено множество работ как в России, так и за ее пределами. В работах [3, 4] рассмотрены вопросы двумерного моделирования конвективных процессов, описаны разностные схемы интегрирования уравнений Навье-Стокса. Весьма популярным является в настоящее время метод расщепления по физическим процессам (Белоцерковский [5], Пейре, Тейлор [6]). Однако ограничение данного подхода — необходимость отыскания избыточного давления. При этом необходимо решать задачу Неймана для трехмерного уравнения Пуассона, что сопряжено с повышенными требованиями к производительности вычислительных систем. В итоге, в качестве наиболее популярного в литературе подхода к моделированию естественной термоконвекции рассматривается упрощенная плоская или двумерная задача. Вместе с тем протекающие физические процессы обусловливают необходимость адекватного воспроизведения вертикальной конвекции, а также горизонтальных градиентных течений. Анализ регистрируемых с помощью радиометра структур конвективных ячеек на поверхности позволяет сделать вывод о существенной трехмерности конвективных ячеек в бассейне (рис. 1).

Сформулированная ниже полная трехмерная (негидростатическая) модель бассейна призвана наиболее полно в явном виде с минимумом параметризации воспроизводить конвективные, турбулентные, вихревые и волновые процессы в лабораторном бассейне.

2. Математическая постановка задачи

В данной работе решается нестационарная трехмерная задача формирования вертикальной термической стратификации лабораторного опытового бассейна. В основе реализованной цифровой копии бассейна



Рис. 1. Мгновенный снимок радиометром температуры поверхности бассейна в момент работы теплового оборудования



лежит классическая система уравнений сохранения массы и импульса (1, 2), дополненная уравнением для переноса трассера c (3) (в рассматриваемом случае — температуры T). Уравнения записаны для движения вязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести:

$$\nabla \cdot \vartheta = \partial_x u + \partial_y v + \partial_z \omega = 0, \tag{1}$$

$$\partial_t v = -(v \cdot \nabla)v - \nabla_P + b\hat{g} - \nabla \cdot \tau + F_v, \qquad (2)$$

$$\partial_t c = -v \cdot \nabla c - \nabla \cdot q_c + F_c , \qquad (3)$$

где $\vartheta(u, v, \omega)$ — скорость среды; $(v \cdot \nabla)v$ — адвекция момента; ∇_p — кинематический градиент давления; $\nabla \cdot \tau$ — молекулярное или турбулентное вязкое напряжение; F_v , F_c — произвольные внутренние источники импульса и трассера; $v \cdot \nabla_c$ — адвекция трассера (температуры); $\nabla \cdot q_c$ — молекулярная или турбулентная диффузия; $b = -\frac{g\rho'}{\rho_0}$ — редуцированное гравитационное ускорение (плавучесть); $\rho = \rho_0 + \rho$ — плотность среды;

Вычисление плотности по температуре проводилось с использованием международного уравнения состояния TEOS-10.

Моделирование нестационарных турбулентных ограниченных течений осуществляется с использованием классического метода моделирования больших вихрей. Для этого представленная система уравнений (1–3) решается для осредненных по времени пульсаций скорости и давления \tilde{u} , \tilde{p} . А подсеточный тензор напряжений представляется как $\tilde{\tau} = \overline{u^* u} - \overline{u} * \overline{u}$ в данном случае он характеризует влияние мелкомасштабной турбулентности на разрешенное (отфильтрованное) поле скорости. В большинстве статей в литературе рассматривается так называемый неявный LES подход, при котором фильтрующая функция не используется, а осреднение по пространству получается «автоматически» за счет сетки. Уравнения решаются численно для \tilde{u} , \tilde{p} , а флуктуационная компонента определяется с помощью подсеточной модели (по Смагоринскому). Роль фильтра играет размер ячейки сетки [6].

В данной постановке реализована идеализированная модель процесса формирования термической стратификации за счет внутренних объемных источников тепла и холода, представленных на рис. 2. При этом, неравномерностью температуры теплоносителя по длине греющего/охлаждающего контуров пренебрегаем.

Были приняты следующие граничные условия и допущения:

- адиабатические стенки бассейна;
- свободный теплообмен с воздухом помещения (нагрев + испарение);

Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала института океанологии... Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology...



Рис. 2. Схема граничных условий и внутренних источников тепла, использованных в модели формирования термической стратификации

Fig. 2. Diagram of boundary conditions and internal heat sources used in the thermal stratification formation model

ньютоновская жидкость с постоянными теплофизическими свойствами;

 тепловые потоки от теплообменников задаются как объемные источники и стоки в уравнении сохранения тепловой энергии.

В качестве начальных условий задавались измеренный начальный профиль температуры и нулевые скорости.

Поверочный расчет для верификации модели произведен по оценочным значениям теплового потока, определенным по данным измерения расходов и температуры теплоносителя в чиллере [1] и в бассейне для подачи и обратного потока (рис. 3). С учетом постоянной времени *kt*, вычисленной как сдвиг по времени между пиками кривых, из теплового баланса определен суммарный поток теплоотдачи контуров в бассейн:

 $Q = Cp*Плотность_теплоносителя*Расход*($ *T*подачи(*t*)-Тобратка(*t*+*kt*)), Ватт (4)

Для прогностических оптимизационных расчетов температура теплоносителя при подаче являлась управляемым параметром, расход теплоносителя принимался постоянным. Отмечается импульсный режим работы теплового оборудования, связанный с конструктивными особенностями тепловых агрегатов.

3. Численное моделирование

Дискретизация систем уравнений (1–3) осуществляется на равномерной сетке с шагом 1 см по всем направлениям методом контрольных объемов [7]. Данное разрешение позволяет уверенно моделировать вихревые движения масштаба порядка 10 см и больше. При необходимости предусмотрена возможность дополнительного сгущения сетки в зоне волнового интерфейса (термоклина). Размер расчетной области соответствует размерам бассейна — 6 × 2 × 1,8 м, количество расчетных узлов — 21,600,000.

В полной нелинейной постановке решение поставленной задачи строится численно с использованием метода конечных объёмов в рамках открытого пакета OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD Tool Box) [8]. Как известно, большинство вычислительных пакетов являются проприетарными программными продуктами и требуют крупных финансовых вложений на этапе их приобретения. Но более важно то, что они содержат закрытый программный код и, как следствие, представляют собой «черный ящик» для исследователя. Это ограничивает возможности по созданию, модификации и верификации новых численных моделей, мешает при оценке точности полученных результатов и т. д. Появление свободного про-



Рис. 3. Особенности работы греющего контура теплового потока по данным измерений температуры теплоносителя

Fig. 3. Characteristics of the heating circuit's thermal flow operation based on heat carrier temperature measurements

граммного пакета OpenFOAM в последние несколько лет позволило изменить данную ситуацию. Широкий инструментарий для формализации задачи, высокая эффективность реализации, а также хорошая масштабируемость под архитектуру вычислительной системы позволяют легко сконструировать численную модель в пакете. Открытый исходный код в свою очередь дает возможность в деталях контролировать ход решения, начиная от построения сетки до выбора схем аппроксимации слагаемых управляющей системы и методов численного решения. В составе Open FOAM входят базовые модели термодинамических свойств веществ, реализующие, к примеру, модель постоянной теплоемкости или рассчитывающие теплоемкости по таблицам JANAF, а также различные модели турбулентности, модели поверхностных пленок пассивной примеси и т. д. Более детальную информацию о методах дискретизации основных уравнений, решения систем линейных уравнений, граничных и постановки начальных условий можно получить из руководства пользователя пакета OpenFOAM [8]. Для расчетов использовалась 64 ядра однопроцессорной система на базе AMD EPYC9554.

4. Результаты

Структура конвективных ячеек на вертикальном поперечном разрезе в различные моменты времени после начала формирования стратификации приведена на рис. 4. Отмечаются зоны интенсивного взаимодействия конвективных потоков ближе к центру бассейна. Интенсивность перемешивания в результате взаимодействия вихревых структур, а также их дальнейшее инерционное продвижение в направлении против действия сил плавучести определяет остроту получаемого термоклина. Данное положение накладывает существенные ограничения на интенсивность нагрева/охлаждения управляющих контуров, что может быть преодолено за счет оптимизированного с использованием цифровой копии комбинированного режима работы оборудования с переменными по времени управляющими параметрами.

Результаты верификации модели по данным контрольного эксперимента по установлению стратификации в бассейне приведены на рис. 5 (среднеквадратичное значение разности измеренных и рассчитанных данных составило около 0,1 °C). Поэтому в целом модель адекватно воспроизводит процесс установления термической стратификации в бассейне.

Преимуществом бассейна СПбФ ИО РАН [1] является возможность более тонкой настройки сложной многослойной стратификации за счет дополнительных контуров, работающих в зависимости от режима на обогрев или охлаждение. В силу наличия развитого конвективного движения внутри бассейна необходим очень тщательный подбор динамических режимов оборудования. Эмпирический подбор необходимых режи-

Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала института океанологии... Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology...



10 мин

30 мин

Рис. 4. Вертикальная структура конвективных ячеек

Fig. 4. Vertical structure of convective cells



Рис. 5. Расчетные (сплошные кривые) и измеренные (символы) значения распределения температуры в центре бассейна для 1-4 часов работы оборудования (указаны цифрами)

Fig. 5. Calculated (solid curves) and measured (symbols) temperature distribution values at the center of the water tank for 1-4 hours of equipment operation (times indicated by numbers)

мов очень трудоемок. Использование цифровой модели позволяет достаточно точно подобрать режимы работы оборудования и сократить количество экспериментальных работ. В частности, опытным путем на основе серии вычислительных экспериментов, определены оптимальные температуры теплоносителя на каждом временном отрезке работы оборудования, существенное превышение которых приводит к интенсификации вертикальных конвективных движений и, как следствие, размытию промежуточного термоклина.

Таким образом был разработан следующий 2-фазный алгоритм установления 3-слойной стратификации:

1-я фаза: интенсивное охлаждение бассейна с задействованием всех контуров на холод — 2 часа работы оборудования с t подачи 2 °C. Линейность получаемого профиля обусловлена тем, что интенсивная вынужденная конвекция захватывает и верхние слои бассейна;

Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Лобанов А.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н. Vankevich R.Ye., Rodionov A.A., Lobanov A.A., Filin K.B., Shpilev N.N.

2-я фаза: постепенный нагрев верхнего и одновременное охлаждение нижнего контуров бассейна — 3 часа работы оборудования с t подачи 1 °C на нижний контур, при этом T подающей воды во внешний контур является зависимой величиной и определяется остаточным теплозапасом нижней трети бассейна. В результате в бассейне устанавливается профиль с резко выраженным скачком температур на глубине 0,6 м, линейным промежуточным слоем и дополнительным слоем скачка плотности на глубине 1,3 м.

Характер полученного профиля соответствует вертикальной структуре вод океана, где присутствуют разнесенные по глубинам главный и сезонные термоклины. Пример результатов совместной работы объекта — бассейна и его цифровой копии приведен на рис. 6.



Рис. 6. Пример 3-слойной стратификации, изначально полученной на цифровой модели (сплошная линия) и подтвержденной опытным путем (точки)

Fig. 6. Example of a three-layer stratification, initially obtained from the digital model (solid line) and experimentally verified (dots)

5. Заключение

Использованы современные наработки в области вычислительной гидродинамики и высокопроизводительных вычислений для оптимизации и частичного замещения дорогостоящих физических экспериментов.

Точное задание и поддержание термической стратификации в бассейне обеспечивается тонкой настройкой режимов работы теплового/холодильного оборудования на основе использования цифровой модели бассейна. В данной работе цифровая копия рассматривается в первую очередь как вспомогательный инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты и, уже как опция, экстраполировать верифицированные опытном путем зависимости для режимов, сложно поддающихся физическому моделированию (высокие числа Рейнольдса и т. п.).

Дополнительным результатом численного моделирования является четкая, объемная, динамическая картина нестационарных процессов внутри бассейна, дающая информацию как для проектирования измерительных систем бассейна, так и состава будущих физических экспериментов. В частности, отмечаемые значительные горизонтальные скорости конвективных потоков могут быть использованы вместо отдельного индуктора течений для создания сдвиговых течений по границе термоклина и исследования их взаимодействия с фронтом возбуждаемых движущимся источником внутренних волн.

Дальнейшее развитие цифровой копии будет вестись в направлении обеспечения динамических экспериментов в стратифицированной среде:

 – генерации внутренних волн волнопродуктором и движущимся погруженным телом за счет добавления сопряженной с описанной расчетной областью динамической расчетной сетки;

- эволюции струйных и сдвиговых течений;

- взаимодействия поверхностных и внутренних волн, а также волн и вихрей.

Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала института океанологии... Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology...

Для контроля пространственных характеристик сложных тонкоструктурных гидрофизических процессов, таких как турбулентные течения, нелинейные волновые процессы рассматривается возможность доукомплектования бассейна системой PIV (Particle Image Velocimetry — анемометрия по изображениям частиц) как метода визуализации двумерных векторных полей.

Цифровая копия бассейна служит существенным дополнением к физическому моделированию, поскольку обеспечивает дополнительное средство проверки в контролируемой среде, оптимизирует методику лабораторного эксперимента, когда объем и состав испытаний определяется на основе моделирования. В результате повышается точность, надежность и репрезентативность физического эксперимента.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0029.

Funding

The work was performed under the State assignment FMWE-2024-0029.

Литература

- 1. Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилев Н.Н. Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 90–99. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7
- Арабаджи В.В., Богатырев С.Д., Баханов В.В. и др. Лабораторное моделирование гидрофизических процессов в верхнем слое океана (большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: сборник научных трудов / под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 2. С. 231–251.
- 3. *Грязнов В.Л., Полежаев В.И.* Исследование некоторых разностных схем и аппроксимаций граничных условий для численного решения уравнений тепловой конвекции: препринт N40. М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1974. 71 с.
- 4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 288 с.
- 5. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
- 6. *Пейре Р., Тейлор Т.Д.* Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 352 с.
- OpenFOAM: User Guide v1912. The open source CFD toolbox. URL: https://www.openfoam.com/documentation/ guides/v1912/doc/guide-turbulence-les-smagorinsky.html (дата обращения: 30.08.2024).
- 8. *Patankar S.V.* Numerical heat transfer and fluid flow, hemisphere public corporation, New York, 1980. https://doi.org/10.1002/cite.330530323.
- 9. OpenFOAM Foundation. 2024. URL: https://openfoam.org/ (дата обращения: 30.08.2024).

References

- Rodionov A.A., Vankevich R. Ye., Lobanov A.A., Glitko O.V., Shpilev N.N. Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences for modeling hydrophysical processes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):90–99. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7 (in Russian)
- Arabadzhi V.V., Bogatyrev S.D., Bakhanov V.V., Kazakov V.I., Korotkov D.P., Serin B.V., Talanov V.I., Shishkina O.D. Installation for modeling hydrophysical processes in the upper layer of the ocean (large thermostratified water tank of the Institute of Applied Physics RAS). *Pripoverkhnostnyy Sloy Okeana: Fizicheskiye Protsessy i Distantsionnoye Zondirovaniye*. IPF RAN: N. Novgorod; 1999. Vol. 2. P. 231–251 (in Russian).
- Gryaznov V.L., Polezhaev V.I. Study of some difference schemes and approximations of boundary conditions for the numerical solution of thermal convection equations: preprint No. 40. M.: In-t problem mekhaniki AN SSSR; 1974. 71 p. (in Russian).
- 4. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. Numerical modeling of heat and mass transfer processes. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury; 1984. 288 p. (in Russian).
- 5. Belotserkovsky O.M. Numerical modeling in continuum mechanics. M.: Nauka; 1984. 520 p. (in Russian).
- 6. Peire R., Taylor T.D. Computational methods in fluid mechanics problems. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1986. 352 p. (in Russian).

- 7. OpenFOAM: User Guide v1912. The open source CFD toolbox. URL: https://www.openfoam.com/documentation/guides/v1912/doc/guide-turbulence-les-smagorinsky.html (date of access: 30.08.2024).
- 8. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publ. Corp.; 1980. doi:10.1002/ cite.330530323
- 9. OpenFOAM Foundation. 2024. URL: https://openfoam.org/ (date of access: 30.08.2024).

Об авторах

- ВАНКЕВИЧ Роман Евгеньевич, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-3891-3396, Scopus AuthorID: 25642198100, WoS ResearcherID: M-3215-2013, SPIN-код: 2295-6136, e-mail: rvankevich@mail.ru
- РОДИОНОВ Анатолий Александрович, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» СПбФ ИО РАН, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru
- ЛОБАНОВ Андрей Александрович, директор СПбФ ИО РАН, доктор технических наук, ORCID: 0009-0006-9064-1849, SPIN-код (РИНЦ): 1030-8262, e-mail: lobanov.aa@spb.ocean.ru
- ФИЛИН Константин Борисович, Начальник Лабораторного комплекса СПбФ ИО РАН, e-mail: filinkb@mail.ru
- ШПИЛЕВ Николай Николаевич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125, ORCID: 0000-0003-3638-3253, e-mail: nn.shpilev@gmail.com
DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9

УДК 551.463.2

© А. А. Родионов, Д. А. Никитин*, К. Б. Филин, Н. Н. Шпилев, Е. Д. Паничева, 2024 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия *dan56fio@mail.ru

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ БАССЕЙН САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Статья поступила в редакцию 09.10.2024, после доработки 09.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

В Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук построен и введён в строй заглушенный гидроакустический бассейн, оснащенный автоматизированной системой закрепления и перемещения измерительных излучателей, приёмников (гидрофонов) и исследуемых моделей объектов. В состав оборудования бассейна входят излучатели, гидрофоны, многофункциональные эхолоты с режимом гидролокаторов бокового обзора, усилители излучающего и приёмного трактов, аналого-цифровые преобразователи, переносные компьютеры с программным обеспечением для формирования излучающих и регистрации принимаемых сигналов. Созданы функционирующие макеты приёмного и излучающего трактов. Разработана математическая модель бассейна на основе расчёта гидроакустических полей методом мнимых источников. Оценено качество заглушенности бассейна, показавшее её удовлетворительное значение. Для проведения экспериментов по исследованию отражающих свойств объектов изготовлены стандартные модели этих объектов. Заглушенный гидроакустический бассейн позволяет проводить исследование характеристик макетов гидроакустических средств, методов формирования и обработки сигналов в активном и пассивном режимах работы; процессов, происходящих в водной среде.

Ключевые слова: гидроакустический бассейн, гидроакустический излучатель, гидрофон, аналого-цифровые преобразователи, математическая модель бассейна, модели объектов

UDC 551.463.4

© A. A. Rodionov, D. A. Nikitin*, K. B. Filin, N. N. Shpilev, E. D. Panicheva, 2024 Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, 117997, Nakhimovsky pr., 36, Moscow, Russia *dan56fio@mail.ru

HYDROACOUSTIC WATER TANK OF ST. PETERSBURG BRANCH OF SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

Received 09.10.2024, Revised 09.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences has constructed and commissioned an acoustically isolated water tank, equipped with an automated system for securing and moving measuring emitters, receivers (hydrophones), and the objects under study. The tank's equipment includes emitters, hydrophones, multifunctional echosounders with side-scan sonar capabilities, amplifiers for both emitting and receiving channels, analog-to-digital converters, and portable computers with software for generating emitting and recording receiving signals. Functional models of both receiving and emitting channels have been created. A mathematical model of the water tank has been developed based on calculations of hydroacoustic fields using the method of imaginary sources. The quality of acoustic isolation in the water tank has been assessed, yielding satisfactory results. Standard models of objects have been manufactured for experiments investigating their reflective properties. The acoustically isolated water tank allows for research into the characteristics of hydroacoustic systems, methods for signal formation and processing in both active and passive modes, as well as processes occurring in aquatic environments.

Keywords: hydroacoustic water tank, hydroacoustic emitter, hydrophone, analog-to-digital converters, mathematical model of the tank, object models

Ссылка для цитирования: *Родионов А.А., Никитин Д.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н., Паничева Е.Д.* Гидроакустический бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 109–121. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9 For citation: Rodionov A.A., Nikitin D.A., Filin K.B., Shpilev N.N., Panicheva E.D. Hydroacoustic Water Tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):109–121. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9

1. Введение

Гидроакустические волны обладают уникальными характеристиками по распространению в морской среде на большие расстояния и по возможности получения информации о гидрофизических процессах и подводных объектах. За сто с лишним лет бурного развития область применения гидроакустики существенно расширились. К крупным задачам, решаемым с помощью гидроакустики [1] относятся:

 поиск, обнаружение, классификация природных и техногенных объектов, находящихся в толще морской воды или на дне;

- картографирование и определение структуры морского дна;

- контроль технического состояния подводных сооружений и трубопроводов;

 обеспечение надводных и подводных пилотируемых и безэкипажных аппаратов средствами навигации и связи;

- телеуправление по гидроакустическому каналу подводными аппаратами;

 сбор, анализ, передача и приём телеметрической информации от гидроакустических средств мониторинга подводной обстановки;

 дистанционная регистрация течений, внутренних волн, распределений гидрофизических полей и др. Для решения всего комплекса научных и прикладных задач гидроакустики проводятся теоретические и экспериментальные лабораторные и натурные исследования, имеющие свои достоинства и недостатки. Наиболее полная информация в области гидроакустики может быть получена на основе теоретического подхода, натурного эксперимента и физического моделирования. Теоретические модели, охватывающие основные закономерности, как правило, являются упрощенными и не могут в полной мере учесть особенности процессов, происходящих в реальных условиях.

Натурные эксперименты позволяют получить реальные данные о гидроакустических полях. Вместе с тем они требуют привлечения значительных материальных, людских и финансовых ресурсов. При этом получение статистически достоверных результатов на практике вызывает большие трудности из-за невозможности многократного повторения экспериментов в одних и тех же гидролого-акустических условиях и при одном и том же взаимном расположении объектов, участвующих в этих экспериментах. Методики пересчёта результатов к заданным условиям (например, в техническом задании) основаны на теоретических моделях и также могут иметь соответствующие ограничения. Существуют и принципиальные технические сложности измерения гидроакустических полей на больших пространственно-временных масштабах.

Преимущества физического моделирования в гидроакустике заключаются в том, что оно не требует больших материальных, людских и финансовых затрат на проведение экспериментов в гидроакустическом бассейне. По принципу подобия результаты лабораторных экспериментов относительно просто пересчитываются на натурные. В бассейне надёжно обеспечивается контроль гидролого-акустических условий и взаимного расположения объектов эксперимента: излучателя, приёмной антенны и модели объекта. Имеется возможность сопровождения результатов физического моделирования теоретической моделью.

Данная статья посвящена описанию конструкции и возможностям гидроакустического бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по физическому моделированию процессов и явлений в морской среде.

В России лабораторные исследования в области гидроакустики проводят довольно большое число организаций. В табл. 1 приведён ряд организаций, которые оснащены гидроакустическими бассейнами, а также основные характеристики бассейнов.

Таблица 1 Table 1

organization powered by nythodeoustic water tank			
		Размеры бас-	
Наименование организации,	ции, Наименование бассейна	сейна, длина	Применацие
место расположения		× ширина ×	примечание
		глубина, м ³	
ОАО «Концерн «Океанприбор»,	Измерительный заглушённый	50×14×10	Грузоподъёмность мостовых коорди-
Санкт-Петербург [2]	бассейн № 1		натных устройств до 3 т
	Измерительный заглушенный	13,5×4,5×4,5	Грузоподъемность трех подъемно-пово-
	бассейн № 2		ротных координатных устройств до 0,5 т

Организации, оснащённые гидроакустическими бассейнами Organization powered by hydroacoustic water tank

Окончание табл. 1

Fin table 1

Наименование организации, место расположения	Наименование бассейна	Размеры бас- сейна, длина × ширина × глубина, м ³	Примечание
ОАО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург [2]	Гидроакустический бассейн № 3	4,5×4,5×4,5	Оснащен тремя образцовыми установ- ками
Акустический институт им. Андре- ева, Москва [3]	Большой заглушенный гидроаку- стический бассейн	21×7×7	Два моста с четырьмя координатно-по- воротными устройствами грузоподъём- ностью 5, 150 и 1500 кг
	Малый заглушенный гидроакусти- ческий бассейн	10×7×7	Два моста с двумя координатно-по- воротными устройствами грузоподъ- ёмностью 10 и 150 кг; три образцовых установки 2-го разряда
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород [4]	Гидроакустический бассейн	4,5×3,5×3	
Кафедра акустики радиофизиче- ского факультета Нижегородского университета, Нижний Новгород [5]	Гидроакустический бассейн	4×5×5	
Южный федеральный универси- тет, Таганрог [6]	Гидроакустический заглушенный бассейн	4×3×2,5	Оснащены поворотно-координатными устройствами
	Гидроакустический заглушенный бассейн	1,5×1×1	
Фирма L–Card, Москва [7]	Опытовый бассейн	3×1,5×0,75	
Крыловский государственный на-	Гидроакустический бассейн	5×3×3	
учный центр, Санкт-Петербург [8]	Заглушенный гидроакустический бассейн		Эксперименты с макетами массой до 2 т

2. Описание конструкции и технического оснащения гидроакустического бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии

Гидроакустический бассейн (рис. 1) с рабочим объёмом 14,4 м³ предназначен для исследования акустических явлений в жидкости. Характеристики бассейна приведены в табл. 2 [9]. Для обеспечения звукопоглощения применена облицовка внутренних поверхностей бассейна резиной. Поверхность бассейна перекрывается наборной крышкой из резины той же марки. Элементы резины закреплены на металлических рамах с ручками. Крышки имеют ширину 40 см и укладываются вдоль короткой стороны бассейна. Опорой для крышек служат торцы листов резины внутренней облицовки бассейна. Съём и установка крышек осуществляется тельфером грузоподъемностью 2000 кг.



Рис. 1. Внешний вид гидроакустического бассейна **Fig. 1**. Appearance of the hydroacoustic water tank

Таблица 2 Table 2

Основные характеристики гидроакустического бассейна

Main characteristics of the hydroacoustic water tank

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Тип бассейна	Опытовый
2	Длина (внутренний габарит ванны бассейна), м	4,0
3	Ширина (внутренний габарит ванны бассейна), м	2,0
4	Глубина (внутренний габарит ванны бассейна), м	2,2
5	Расчетная площадь зеркала воды, м ²	8,0
6	Объем бассейна, м ³	17,6

Для снижения влияния внешних техногенных шумовых помех фундамент бассейна развязан относительно фундамента здания, а сам бассейн установлен на амортизаторы.

В бассейне установлена автоматизированная система линейного перемещения (рис. 2), которая обеспечивает закрепление измерительных излучателей и приемников и испытуемых образцов, перемещение их вдоль и поперек бассейна, вверх, вниз и вращение вокруг геометрической оси, а также отсчет и регистрацию значений текущих координат. Её основные характеристики приведены в табл. 3. Предусмотрено устройство комплекса водоподготовки для заполнения гидроакустического бассейна в составе:

- фильтр грубой очистки;
- система удаления мутности и обезжелезивания;
- фильтр тонкой очистки;
- ультрафиолетовый стерилизатор.

Уникальность гидроакустического бассейна, в отличие от других гидроакустических бассейнов, заключается в том, что в нём может создаваться стратификация по плотности за счёт системы «подогрева — охлаждения воды» гидрофизического бассейна, оснащенного системой термостратификации и термокосами для её регистрации. По сравнению с другими бассейнами, приведёнными в табл. 1, по своим размерам бассейн занимает среднее положение. Меньшие объёмы воды существенно сокращают время подготовки к проведению экспериментов, упрощают и удешевляют эксплуатацию бассейна.



Рис. 2. Схема автоматизированной системы линейного перемещенияFig. 2. Diagram of the automated linear displacement system

Таблица 3 Table 3

Основные характеристики автоматизированной системы линейного перемещения

Main characteristics of the automated linear movement system

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Количество систем перемещения	2
2	Пределы перемещения по осям, мм:	X — 3500 Y — 1600
3	Вращение стойки с нагрузкой вокруг оси Z, система 1	Не ограничено
4	Вращение стойки с нагрузкой вокруг оси Z, система 2	Не предусмотрено
5	Скорость перемещения в водной среде, мм/мин	3000
6	Точность позиционирования, мм	±5
7	Максимальная масса полезной нагрузки, кг	50

Для проведения лабораторных экспериментов созданы макеты приёмного и излучающего трактов. Приёмный тракт (рис. 3) включает в свой состав: гидрофоны фирмы Brüel & Kjær типов 8103 и 8105; 4-канальный усилитель Nexus фирмы Brüel & Kjær; аналого-цифровые преобразователи (АЦП) E14–440 и E20– 10 фирмы L–CARD; цифровой осциллограф Hantek DSO 1062B; переносной компьютер (ноутбук) Lenovo с программным обеспечением L-GRAF фирмы L–CARD.

В состав излучающего тракта (рис. 4) входят: переносной компьютер (ноутбук) Lenovo; усилитель звуковой частоты КАР-47 с согласующим устройством (трансформатором); гидрофоны фирмы Brüel & Kjær типов 8103 и 8105. Для устранения влияния сетевой помехи частотой 50 Гц питание всей аппаратуры осуществляется от аккумуляторных батарей.

Измерительные гидрофоны фирмы Brüel & Kjær 8103 и 8105 (рис. 5) предназначены для преобразования звуковых сигналов, распространяющихся в воде, в электрическое напряжение с целью дальнейшего усиления и регистрации. Они являются обратимыми и могут использоваться в качестве излучателей звуковых сигналов. Миниатюрный гидрофон 8103 оснащен малошумящим интегральным кабелем с двойной экранировкой. Основные характеристики гидрофонов приведены в табл. 4 [10].



Рис. 3. Макет приёмного тракта

Fig. 3. Model of the receiving path





Fig. 4. Model of the emitting path



Рис. 5. Внешний вид измерительных гидрофонов: *a* — 8103; *δ* — 8105
Fig. 5. Appearance of measuring hydrophones: *a* — 8103; *b* — 8105

Для усиления звуковых сигналов, принятых гидрофонами, служит 4-канальный измерительный усилитель NEXUS2692 — OS4 фирмы Brüel & Kjær. Его основные характеристики приведены в табл. 5 [11].

Для просмотра гидроакустических сигналов предназначен портативный двухканальный цифровой осциллограф Hantek DSO 1062B. Его основные технические характеристики представлены в табл. 6 [12]. Регистрация сигналов осциллографа осуществляется на портативную видеокамеру.

Для оцифровки гидроакустических сигналов используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) E-14—440 и E 20—10 фирмы L—Card [13]; их характеристики указаны в табл. 7. Регистрация оцифрованных сигналов осуществляется с помощью программного обеспечения L-GRAF фирмы L—Card.

> Таблица 4 Table 4

Основные характеристики гидрофонов 8103, 8105

Main characteristics of hydrophones 8103, 8105

V	Тип гидрофона		
Характеристики	8103	8105	
Диапазон частот, Гц	0,1-180000	0,1–160000	
Чувствительность в режиме приёма, мкВ/Па	29	56	
Чувствительность в режиме излучения, Па/В	0,1 на частоте 20 кГц; 3,98 на частоте 100 кГц	0,316 на частоте 20 кГц; 11,9 на частоте 100 кГц	
Длина, мм	50	93	
Диаметр, мм	9,5	22	
Масса с интегрированным кабелем, кг	0,170	1,6	
Длина кабеля, м	6	10	
Количество	2	2	

Таблица 5

Table 5

Основные характеристики усилителя NEXUS2692 — OS4

Main characteristics of the	NEXUS2692 —	OS4 amplifier
-----------------------------	-------------	----------------------

Характеристики	Значение
Диапазон частот, Гц	0,1-100000
Граничная частота фильтра верхних частот, Гц	0,1; 1,0; 10
Граничная частота фильтра нижних частот, кГц	0,1; 1; 3; 10; 22,4; 30; 100
Усиление, дБ	-20-+60
Размеры: высота, ширина, глубина, мм	90, 144, 230
Масса, кг	3

Таблица б

Table 6

Технические характеристики осциллографа Hantek DSO 1062B

Technical Specifications of the Hantek DSO 1062B Oscilloscope

Характеристики	Значение	
Аналоговая полоса пропускания, МГц	60	
Максимальная частота дискретизации, МГц	1000 при одном канале; 500 при двух каналах	
Количество каналов	2	
Время нарастания, нс	5,8	
Габаритные размеры, мм	245×163×52	
Масса, кг	1,3	

Родионов А.А., Никитин Д.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н., Паничева Е.Д. Rodionov A.A., Nikitin D.A., Filin K.B., Shpilev N.N., Panicheva E.D.

В качестве генератора сигналов применяется звуковая карта персонального компьютера с частотой дискретизации 192 кГц. С линейного выхода компьютера моделируемый сигнал поступает на вход усилителя звуковой частоты КАР-47. Его основные характеристики приведены в таблице 8 [14]. После усиления сигнал подаётся на согласующий трансформатор и на излучающий гидрофон.

Таблица 7

Table 7

Основные характеристики АЦП фирмы L-Card

Main characteristics of the ADC from L-Card

Характеристики	Значение	
	E20-10	E14-440
Частота дискретизации, МГц	10	0,4
Разрядность АЦП	14	14
Количество каналов	4	16; 32
Напряжение входного сигнала, В	\pm 3; \pm 1; \pm 0,3	\pm 10; \pm 2,5; \pm 0,625; \pm 0,156
Габаритные размеры, мм	140×110×35	140×96×30
Масса, г	350	200

Таблица 8

Table 8

Технические характеристики усилителя звуковой частоты КАР-47

Technical specifications of the K	KAP-47 audio frequency a	amplifier
-----------------------------------	--------------------------	-----------

Характеристики	Значение
Выходная мощность, Вт	100
Частотный диапазон, Гц	20-20000
Входная чувствительность, В	0,15-5
Количество каналов	4
Габаритные размеры, мм	250×55×450

Для проведения экспериментов также используются эхолоты Garmin и Lowrance (рис. 6). Оба эхолота являются многофункциональными, оснащены цветными экранами, имеют встроенный модуль GPS, позволяющий планировать и создавать маршруты. Эхолоты способны построить собственную карту глубин, также они работают в режиме гидролокатора бокового обзора (ГБО). Для эхолота Lowrance предусмотрена регистрация сигналов на SD-карту. Основные характеристики эхолотов приведены в табл. 9 [15, 16].



Рис. 6. Экраны эхолотов: a — Garmin; δ — Lowrance Fig. 6. Screens of Echo Sounders: a — Garmin; b — Lowrance

`Таблица 9 Table 9

Основные характеристики эхолотов Garmin и Lowrance

Main characteristics of Garmin and Lowrance echo sounders

Variationality	Значение		
Характеристики	Garmin	Lowrance	
Частотный диапазон, кГц	Эхолот 50/77/200; ГБО 260/455/800.	Эхолот 50/83/200; ГБО 455/800	
Диапазон рабочих температур, °С	-20+70	-15+55	
Размеры по высоте, глубине и ширине, мм	235; 58; 140	160,8; 63,7; 219,5	
Масса, кг	0,8	0,73	

В настоящее время для проведения экспериментов по исследованию отражающих свойств объектов изготовлены следующие модели: сплошные стальные сферы диаметром 2 см, 3 см, пустотелые стальные сферы диаметром 3 см, 5 см, 8 см и пустотелые стальные цилиндры диаметром 2,5 и 3 см, длиной 30 см, с оконечностями, представляющими две полусферы диаметром 2,5 и 3 см. Внешний вид моделей показан на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид моделей

Fig. 7. Appearance of the models

3. Математическая модель бассейна

Для оценки возможностей проведения экспериментальных исследований в гидроакустическом бассейне, отработки методик и анализа результатов разработана математическая модель бассейна. В случае, когда температура в бассейне постоянна на момент проведения эксперимента (T = const), скорость звука в бассейне также постоянна C = C(T) = const.

Суммарное акустическое поле в точке измерения может быть рассчитано модифицированным методом мнимых источников при прямолинейном распространении акустических волн. В этом случае учитываются отражения не только от дна и поверхности, но и от боковых стенок бассейна.

При использовании в качестве зондирующих сигналов коротких импульсов суммарное поле определяется формулой [17]:

$$S(t) = \sum_{0}^{K} S_k \left(t - \frac{r_k}{C} \right), \tag{1}$$

где S_k — давление сигнала, распространяющегося по k-й трассе с учётом коэффициента отражения и длины трассы, Па; $S_k = S/r_k$ здесь S — модель сигнала на расстоянии 1 м; r_k —длина k-й трассы, м; K — количество трасс. Нулём обозначена трасса распространения прямого сигнала.

При использовании непрерывных тональных сигналов суммарное поле определяется формулой:

$$S(t) = \sum_{0}^{K} A_{k} \left(\omega t - \frac{\omega \Delta r_{k}}{C} \right), \tag{2}$$

где A_k — амплитуда сигнала, распространяющегося по k-й трассе с учётом коэффициента отражения и длины трассы, Па; $A_k = A/r_k$ здесь A — амплитуда сигнала на расстоянии 1 м; Δr_k — разность длин k-й и нулевой трассы, м; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота сигнала, радиан/с. Родионов А.А., Никитин Д.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н., Паничева Е.Д. Rodionov A.A., Nikitin D.A., Filin K.B., Shpilev N.N., Panicheva E.D.

Проведена оценка потерь на затухание при распространении сигнала в бассейне на расстояния 1, 2, 3 и 4 м в зависимости от частоты (рис. 8). Для дистиллированной воды теоретический коэффициент затухания определяется по формуле [1]:

$$\beta = 6.7 \cdot 10^{-11} \cdot f^2 \,, \tag{3}$$

где β — коэффициент затухания, дБ/км; *f* — частота, Гц. Однако теоретический коэффициент затухания составляет одну треть от измеренного. При расчётах это обстоятельство было учтено. Максимальные потери сигнала на частоте 200 кГц при распространении на расстояние 4 м составили величину 0,032 дБ. Столь малую величину можно не учитывать при проведении моделирования сигналов.



Цифры у кривых соответствуют расстояниям распространения сигнала



Fig. 8. Attenuation losses in signal propagation in the water tank

В зависимости от частоты импульсов, используемых при оценке отражающих свойств моделей, они линейно могут быть пересчитаны на размеры реальных объектов в натурных условиях. Так, например, для частоты 200 кГц модель цилиндра длиной 30 см и диаметром 3 см будет соответствовать, при использовании в натурных условиях импульсов частотой 2 кГц, реальному объекту длиной 30 м и диаметром 3 м, а для импульсов частотой 1 кГц — объекту длиной 60 м и диаметром 6 м.

4. Оценка качества звукозаглушения бассейна

Качество измерений в заглушенном бассейне оценивается величиной акустического отношения [18]:

$$R = \frac{P_{\rm O}^2}{P_{\rm H}^2},$$
 (4)

где $P_{\rm O}$ — суммарное звуковое давление отражённых сигналов, приходящих в точку приёма, Па; P_{Π} — звуковое давление, поступающее от источника по прямому пути в точку приёма, Па. Если R < 0,16, то влиянием отражённых сигналов в большинстве случаев можно пренебречь. Несмотря на наличие заглушающих кон-

струкций, часто применяют импульсный режим работы, выбирая длительность импульса $\tau < \frac{d}{2C}$, где d — наименьший габарит бассейна, м.

Проведено моделирование сигналов, отраженных от поверхностей бассейна. На рис. 9 показаны расположение гидроакустического излучателя — Z и приёмника (гидрофона) — P, а также траектории звуковых лучей, однократно отразившихся от поверхностей бассейна. Расстояние по трассам 1—6 определяются по формулам:

$$r_{1} = \sqrt{4(B-b)^{2} + r^{2}}; r_{2} = \sqrt{4(H-h)^{2} + r^{2}}; r_{3} = \sqrt{4h^{2} + r^{2}}; r_{4} = \sqrt{4b^{2} + r^{2}}; r_{5} = 2l + r; r_{5} = 2(L-l) - r.$$
(5)

Разности времён прихода сигналов от излучателя к приёмнику по трассам рассчитываются по формуле

$$\Delta \tau_i = \frac{r_i - r}{C} \,, \tag{6}$$

где ρ_i — длина *i*-й трассы, м.

Рис. 9. Траектории лучей от излучателя к приёмнику в гидроакустическом бассейне Буквами обозначены: L, B, H — размеры бассейна: длина, ширина и глубина соответственно; r — расстояние между излучателем и приёмником, h — глубина расположения излучателя и приёмника, l — расстояние от короткой стенки бассейна до излучателя, b — расстояние от передней стенки бассейна до излучателя и гидрофона; цифрами обозначены области однократного отражения лучей, распространяющихся по траекториям: 0 — ZP; 1 — Z1P; 2 - Z2P; 3 - Z3P; 4 - Z4P; 5 - Z5P; 6 - Z6P

Fig. 9. Trajectories of rays from the emitter to the receiver in the hydroacoustic water tank. The letters denote: L, B, H - dimensions of the water tank:

length, width, and depth, respectively; r – distance between the emitter and receiver; h – depth of the emitter and receiver placement; l – distance from the short wall of the pool to the emitter; b – distance from the front wall of the water tank to the emitter and hydrophone. The numbers indicate areas of single reflection of rays propagating along the trajectories: 1 - Z1P; 2 - Z2P; 3 - Z3P; 4 - Z4P; 5 - Z5P; 6 - Z6P

На рис. 10 приведены результаты регистрации реального сигнала (в верхней части рисунка) и компьютерного моделирования при условии идеального отражения акустических импульсов от поверхностей бассейна (в нижней части рисунка).



Рис. 10. Регистрация и моделирование импульсных сигналов в бассейне **Fig. 10.** Registration and modeling of pulse signals in the water tank



Проведены измерения отраженных сигналов от поверхностей бассейна в диапазоне частот от 14 до 30 кГц. В соответствии с формулой (4) значение величины R не превысило 0,08, что соответствует удовлетворительной степени заглушенности бассейна.

5. Заключение

Таким образом, созданный и введённый в строй гидроакустический бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук представляет собой уникальный научно-исследовательский комплекс, оснащенный современными средствами моделирования, излучения, приёма, обработки и анализа гидроакустических сигналов. Он позволяет проводить:

- исследования характеристик макетов излучающих и приёмных гидроакустических антенн;

 исследования отражающих свойств объектов различных формы и материала с масштабированием полученных результатов на реальные объекты;

- исследования отражающих свойств биологических объектов (рыб);
- регистрацию шумоизлучения макетов подводных техногенных объектов;
- регистрацию сигналов биологических объектов (рыб);
- исследования акустических характеристик звукопоглощающих материалов;
- исследования акустических характеристик воздушных пузырьков;
- исследования методов формирования и излучения гидроакустических сигналов;
- исследования методов приёма гидроакустических сигналов;

 – физическое моделирование функционирования макетов гидроакустических устройств различного назначения;

- оценку работоспособности малогабаритных образцов гидроакустических средств;
- исследования формирования акустических полей в вертикально стратифицированной водной среде.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0029.

Funding

The work was performed under the State assignment FMWE-2024-0029.

Литература

- 1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
- 2. Опытовые гидроакустические бассейны. URL: www.oceanpribor.ru (дата обращения: 5.11.2024).
- 3. Гидроакустические измерительные бассейны. URL: http://old.akin.ru/ (дата обращения: 5.11.2024).
- 4. Геофизические исследования, акустика и гидроакустика. URL: https://old.ipfran.ru/science/base.html (дата обращения: 5.11.2024).
- 5. Кафедра акустики. Радиофизический факультет. Нижегородский университет им. Лобачевского URL: https://rf.unn.ru/o-fakultete/struktura/kafedry/acoustic/ (дата обращения: 7.11.2024).
- 6. Уникальная научная установка. URL: https://sfedu.ru/www/stat_pages22.show?p=USC/main/M (дата обращения: 5.11.2024).
- 7. Широков В.А., Милич В.Н. Экспериментальный комплекс для исследования возможностей использования гидроакустических датчиков в системах подводного видения // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 54–64. doi:10.22213/2413-1172-2021-4-54-64
- 8. Крыловский государственный научный центр URL: https://krylov-centre.ru/activities/the-ship-acoustics/the-experimental-base-of/ (дата обращения: 08.11.2024).
- 9. Уникальная научная установка «Лабораторно-испытательный комплекс». Гидроакустический бассейн. URL: https://spb.ocean.ru/wp-content/uploads/2021/04/Dokumentaciya-GAB.pdf (дата обращения: 12.04.2024).
- 10. Сведения об изделии. Гидрофоны типы 8103, 8104, 8105 и 8106. URL: https://kiptm.ru/images/Production/ bruel/Gidrofony-8103-8104-8105-8106-opisanie.pdf (дата обращения: 12.04.2024).
- 11. Серия усилителей-формирователей NEXUS типы 2690, 2691, 2692 и 2693 URL: https://kiptm.ru/images/ Production/bruel/amplifiers_and_signal_conditioners/2692-A-NEXUS-Usilitel.pdf (дата обращения: 12.04.2024).
- 12. Hantek. Осциллографы цифровые портативные. Серия: Hantek DSO 1000В. Руководство по эксплуатации. URL: https://supereyes.ru/img/instructions/Hantek_DSO1000B_rumanual.pdf (дата обращения: 12.04.2024).

- 13. L-CARD. Измерительное оборудование. Каталог продукции. М.: Л КАРД, 2010. 98 с.
- 14. Руководство по эксплуатации усилителя. URL: https://img.mvideo.ru/ins/261819.pdf (дата обращения: 12.04.2024).
- 15. Garmin. URL: https://www.garmin.ru/eholoty/catalog/striker/striker-vivid-7sv-no-transducer/#parameters (дата обращения: 12.04.2024).
- 16. Lowrance. URL: https://lowrance.ru/shop/elite-ti/lowrance-elite-7-ti/ (дата обращения: 12.04.2024).
- 17. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах, 2-е изд.: М: Наука, 1973. 343 с.
- 18. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Ляликов А.П. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1982. 344 с.

References

- 1. Robert J. Urick. Principles of Underwater Sound, Third edition. USA, 1983. 416 p.
- 2. Experimental Hydroacoustic Pools. URL: www.oceanpribor.ru (accessed: 5.11.2024).
- 3. Hydroacoustic Measuring Pools. URL: http://old.akin.ru/ (accessed: 8.11.2024).
- 4. Geophysical Research, Acoustics, and Hydroacoustics. URL: https://old.ipfran.ru/science/base.html (accessed: 5.11.2024).
- Department of Acoustics. Radiophysical Faculty. Lobachevsky Nizhny Novgorod University. URL: https://rf.unn.ru/ofakultete/struktura/kafedry/acoustic/ (accessed: 7.11.2024).
- 6. Unique Scientific Installation. URL: https://sfedu.ru/www/stat_pages22.show?p=USC/main/M (accessed: 5.11.2024).
- Shirokov V.A., Milich V.N. Experimental Complex for Investigating the Capabilities of Using Hydroacoustic Sensors in Underwater Vision Systems. Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. 2021;24(4):54– 64. doi:10.22213/2413-1172-2021-4-54-64 (in Russian).
- 8. Krylov State Scientific Center URL: https://krylov-centre.ru/activities/the-ship-acoustics/the-experimental-base-of/ (accessed: 8.11.2024).
- 9. Unique Scientific Installation "Laboratory Testing Complex." Hydroacoustic Pool. URL: https://spb.ocean.ru/wp-content/uploads/2021/04/Dokumentaciya-GAB.pdf (accessed: 12.04.2024).
- 10. Product Information. Hydrophones Types 8103, 8104, 8105, and 8106. URL: https://kiptm.ru/images/Production/ bruel/Gidrofony-8103-8104-8105-8106-opisanie.pdf (accessed: 12.04.2024).
- 11. NEXUS Amplifier-Formers Series Types 2690, 2691, 2692, and 2693 URL: https://kiptm.ru/images/Production/ bruel/amplifiers_and_signal_conditioners/2692-A-NEXUS-Usilitel.pdf (accessed: 12.04.2024).
- 12. Hantek. Digital Portable Oscilloscopes. Series: Hantek DSO 1000B. User Manual. URL: https://supereyes.ru/img/instructions/Hantek_DSO1000B_rumanual.pdf (accessed: 12.04.2024).
- 13. L-CARD. Measuring Equipment. Product Catalog. Moscow: L CARD; 2010. 98 p.
- 14. User Manual for Amplifier. URL: https://img.mvideo.ru/ins/261819.pdf (accessed: 12.04.2024).
- 15. Garmin. URL: https://www.garmin.ru/eholoty/catalog/striker/striker-vivid-7sv-no-transducer/#parameters (accessed: 12.04.2024).
- 16. Lowrance. URL: https://lowrance.ru/shop/elite-ti/lowrance-elite-7-ti/ (accessed: 12.04.2024).
- 17. Brekhovskikh L.M. Waves in Layered Media, 2nd ed.: Moscow: Nauka; 1973. 343 p. (in Russian)
- 18. Evtutov A.P., Kolesnikov A.E., Lyalykov A.P. et al. Handbook on Hydroacoustics. L.: Sudostroeniye; 1982. 344 p. (in Russian).

Об авторах

- РОДИОНОВ Анатолий Александрович, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» СПбФ ИО РАН, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru
- НИКИТИН Дмитрий Алексеевич, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук, e-mail: dan56fio@mail.ru
- ФИЛИН Константин Борисович, начальник Лабораторного комплекса СПбФ ИО РАН, e-mail: filinkb@mail.ru
- ШПИЛЕВ Николай Николаевич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-3638-3253, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125, e-mail: nn.shpilev@gmail.com
- ПАНИЧЕВА Елизавета Дмитриевна, младший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, SPIN-код (РИНЦ): 4674-9774, e-mail: 1_pan99@mail.ru

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 2024 (Т. 17)

N⁰	НАЗВАНИЕ РАЗДЕЛА	Выпуск	Страницы
	ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ГИДРОФИЗИКИ		
1.	<i>К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. Е. Капранов</i> Моделирование взаимодействия вихревого кольца с нормально расположенной пло- ской преградой	1	8-22
	ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ПРОЦЕССИ	51	
2.	А. А. Родионов, Р. Е. Ванкевич, М. К. Клеванная, Н. Е. Вольцингер Моделирование баротропной приливной динамики Курильского региона	1	23-38
3.	В. А. Горчаков, А. Ю. Дворников, С. М. Гордеева, В. А. Рябченко, Д. В. Сеин Пространственная структура временной изменчивости температуры поверхности ар- ктических морей	1	39-51
4.	А. А. Коник, О. А. Атаджанова, Е. В. Сентябов Анализ мезомасштабных фронтальных зон Норвежского моря по спутниковым наблю- дениям и данным реанализа в мае 2011–2020 гг.	1	52-62
5.	И. А. Капустин, А. А. Мольков, А. В. Ермошкин, Д. В. Доброхотова, О. А. Даниличева, Г. В. Лещев Восстановление структуры течений в Куйбышевском водохранилище с использованием спутниковых данных и натурных измерений	1	63-72
6.	<i>Н. Н. Филатов, О. П. Савчук, В. Н. Баклагин, Н. Е. Галахина, М. Б. Зобков, А. В. Исаев,</i> <i>С. А. Кондратьев, Н. М. Калинкина, Ю. С. Новикова, А. М. Расулова, М. В. Шмакова</i> Диагноз состояния и изменений экосистемы Онежского озера и водосбора на основе информационно—аналитической системы	2	10-24
7.	<i>Т. Р. Еремина, О. В. Хаймина, О. М. Владимирова</i> Влияние климатических и социально—экономических изменений на состояние экосистем Балтийского моря	2	25-34
8.	Б. В. Чубаренко, Ю. А. Горбунова, Д. А. Домнин Сценарный анализ социально—экономических и климатических изменений нагрузки и удержания биогенных веществ в водосборе реки Преголи (Юго—Восточная Балтика): взгляд на начало XXI века	2	35-49
9.	<i>А. В. Исаев, В. А. Рябченко, А. А. Коник</i> Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера	2	50-65
10	<i>Н. А. Березина, Н. Н. Камардин, А. Н. Шаров</i> Биоаккумуляция кадмия и меди в разных районах восточной части Финского залива	2	66-80
11	А. А. Максимов, Н. А. Березина, О. Б. Максимова Макрозообентос восточной части Финского залива: современное состояние и влияние на биогеохимические процессы	2	81-93
12	В. Т. Пака, В. М. Журбас, М. Н. Голенко, А. О. Корж, А. А. Кондрашов Изменчивость потока соленой воды в канале Хобург, Балтийское море: измерения и моделирование NEMO	2	94-102
13	<i>Н. А. Тихонова, Е. А. Захарчук, А. В. Гусев, В. С. Травкин, А. А. Павловский</i> Влияние современных намывов территорий на изменения уровня в Невской губе во время штормовых нагонов в условиях работы комплекса защиты Санкт–Петербурга от наводнений	2	103-118
14	И. А. Суторихин, В. В. Кириллов, С. А. Литвиненко, Р. К. Свиридов, В. А. Соловьев, Г. В. Феттер Гидрофизические характеристики озера Манжерокского после дноуглубительных работ	3	115-126
15	В. В. Жмур, Т. В. Белоненко, Е. В. Новоселова, Б. П. Суетин Трансформация мезомасштабных океанических вихрей в филаменты: анализ данных альтиметрии	4	8-31
16	<i>А. В. Исаев, В. А. Рябченко</i> Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы	4	32-42

17	А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, А. А. Коник, А. В. Исаев	4	43-54
	Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изобра-		
	жении Sentinei–1 с января по декаорь 216–2022 гг.		
18	Р. Ю. Монахов, А. А. Родионов, И. Е. Капранов, Н.Н. Шпилев, М.С. Яковчук	4	55-70
	Численное и физическое моделирование генерации и эволюции вихревых колец в круп-		
	номасштабном гидрофизическом бассейне		
19	В.В. Суслин, О.В. Кудинов, А.А. Латушкин, И.А. Суторихин, В.В. Кириллов, О.В. Мартынов	4	71-76
	Взаимосвязь биооптических характеристик Телецкого озера на разных горизонтах по		
	результатам экспедиции в августе 2023 года		
20	Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А., Софьина Е.В.,	4	77-89
	Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я.		
	Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры		
	минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива: натурный эксперимент в период		
	нереста		
	ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ, ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ		

21	А. В. Погорелова, В. Л. Земляк, В. М. Козин	1	73-83
	Волновое сопротивление тонкого тела при нестационарном движении под ледяным		
	покровом		

ГИДРОАКУСТИКА

22	А. Д. Консон, А. А. Волкова	1	84-94
	Метод локализации источника широкополосного шумового сигнала горизонтальной		
	линейной антенной в зоне Френеля вблизи границы «вода—воздух»		

ГИДРООПТИКА

23	В. А. Глухов, Ю. А. Гольдин	1	104-128	
	Морские радиометрические лидары и их использование для решения океанологических			
	задач			
24	М. Е. Ли, Е. Б. Шибанов	3	9-20	
	Новый подход к определению спектрального поглощения света морской водой в кони-			
	ческой отражающей кювете с интегрирующей сферой			
25	А. Г. Лучинин, М. Ю. Кириллин, Л. С. Долин	3	21-31	
	Сигнал обратного рассеяния в подводных лидарах со сложно модулированным зондиру-			
	ющим пучком			
26	В. А. Глухов, Ю. А. Гольдин, О. В. Глитко, Д. И. Глуховец, М. А. Родионов	3	32-43	
	Сопоставление информативности ортогонально поляризованных компонент лидарного			
	эхо-сигнала для оценки гидрооптических характеристик приповерхностного слоя			
27	Р. Г. Гардашов, Э. Р. Гардашов	3	57-72	
	Солнечные блики и подводные каустики в дистанционном зондировании морей и			
	океанов			
28	Д. И. Глуховец, С. В. Шеберстов	3	73-83	
	Влияние фитопланктона на альбедо океана			
29	В. И. Маньковский, Е. В. Маньковская	3	84-90	
	Способ оценки показателя вертикального ослабления нисходящей облученности по			
	показателю ослабления света в водах Черного моря			
	ТЕХНИЧЕСКАЯ ГИДРОФИЗИКА			
30	А.И. Машошин, А.В. Цветков	1	95-103	
	Методика расчёта глубины проникновения в грунт при морской сейсморазведке			
31	Н.А. Богатов, А.В. Ермошкин	3	44-56	

31	Н.А. Богатов, А.В. Ермошкин	3	44-36
	Стереооптические методы регистрации процессов на морской поверхности		
32	Д.Н. Дерягин, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец	3	91-101
	Влияние параметров поверхностного слоя в Карском море на точность оценки концен-		
	трации хлорофилла—а биооптическими алгоритмами		
33	П.А. Салюк, Д.И. Глуховец, А.Ю. Майор, Н.А. Моисеева, Е.А. Штрайхерт, А.А. Латушкин,	3	102-114
	Н.А. Липинская, И.А. Голик, С.А. Мошаров, М.И. Горбов		
	Особенности работы эмпирических биооптических алгоритмов для оценки концентра-		
	ции хлорофилла «а» из спутниковых данных по цвету моря в водах вокруг Антарктиче-		
	ского полуострова		

34	А.А. Родионов, Р.Е. Ванкевич, А.А. Лобанов, О.В. Глитко, Н.Н. Шпилев Термостратифицированный бассейн Санкт—Петербургского филиала Института океа- нологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов	4	90–99	
35	<i>Р.Е. Ванкевич, А.А. Родионов, А.А. Лобанов, К.Б. Филин, Н.Н. Шпилев</i> Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт–Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН	4	100-108	
36	А.А. Родионов, Д.А. Никитин, К.Б. Филин, Н.Н. Шпилёв, Е.Д. Паничева Гидроакустический заглушенный бассейн Санкт—Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН	4	109-121	
	ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ ГИДРОФИЗИКИ			
37	<i>Т.Р. Минина, В.В. Меншуткин, Н.Н. Филатов</i> О математическом моделировании в лимнологии, океанологии, экологии и экономике в работах В.В. Меншуткина	2	119–133	
	ХРОНИКА			
38	<i>А.А. Родионов</i> 300 лет Российской академии наук и развитие гидрофизики и океанологии в Санкт-Пе- тербурге — Ленинграде	1	129	
39	Памяти Михаила Павловича Иванова	1	130-131	
40	Памяти Максима Анатольевича Родионова	3	127	
	РАЗНОЕ			
41	Предисловие к тематическому выпуску «Моделирование и экспериментальные иссле- дования гидрофизических и биогеохимических процессов Балтийского моря и озер Северо-Запада РФ»	2	8-9	

Авторский указатель 2024 (Т. 17)

Атаджанова О.А. — № 1, 4 (2 статьи) Баклагин В.Н. — № 2 Белоненко Т.В. — № 4 Березина Н.А. — № 2 (2 статьи) Богатов Н.А. — № 3 Вазюля С.В. — № 3 Ванкевич Р.Е. — № 1, 4 (2 статьи) Варкентин А.И. — № 4 Владимирова О.М. — № 2 Волков К.Н. — № 1 Волкова А.А. — № 1 Вольцингер Н.Е. — № 1 Галахина Н.Е. — № 2 Гардашов Э.Р. — № 3 Гардашов Р.Г. — № 3 Глитко О.В. — № 3, 4 Глухов В.А. — № 1, 3 Глуховец Д.И. — № 3 (4 статьи) Голенко М.Н. — № 2 Голик И.А. — № 3 Гольдин Ю.А. — № 1, 3 Горбов М.И. — № 3 Горбунова Ю.А. — № 2 Гордеева С.М. – № 1 Горчаков В.А. — № 1 Гусев А.В. — № 2 Даниличева О.А. — № 1 Дворников А.Ю. — № 1 Дерягин Д.Н. — № 3 Доброхотова Д.В. — № 1 Долин Л.С. — № 3 Домнин Д.А. — № 2 Емельянов В.Н. — № 1 Еремина Т.Р. — № 2 Ермошкин А.В. — № 1, 3 Жмур В.В. — № 4 Журбас В.М. — № 2 Захарчук Е.А. — № 2 Земляк В.Л. — № 1

Зимин А.В. — № 4 (2 статьи) Зобков М.Б. — № 2 Исаев А.В. — № 2 (2 статьи), 4 (2 статьи) Калинкина Н.М. — № 2 Камардин Н.Н. — № 2 Капранов И.Е. — № 1, 4 Капустин И.А. — № 1 Кириллин М.Ю. — № 3 Кириллов В.В. — № 3, 4 Клеванная М.К. — № 1 Козин В.М. — № 1 Кондратьев С.А. — № 2 Кондрашов А.А. — № 2 Коник А.А. — № 1, 2, 4 (2 статьи) Консон А.Д. — № 1 Корж А.О. — № 2 Кудинов О.В. — № 4 Латушкин А.А. — № 3, 4 Лещев Г.В. — № 1 Ли М.Е. — № 3 Липинская Н.А. — № 3 Литвиненко С.А. — № 3Лобанов А.А. — № 4 (2 статьи) Лучинин А.Г. — № 3 Майор А.Ю. — № 3 Максимов А.А. — № 2 Максимова О.Б. — № 2 Маньковская Е.В. — № 3 Маньковский В.И. — № 3 Мартынов О.В. — № 4 Машошин А.И. — № 1 Меншуткин В.В. — № 2 Минина Т.Р. — № 2 Моисеева Н.А. — № 3 Мольков А.А. — № 1 Монахов Р.Ю. — № 4 Мошаров С.А. — № 3 Никитин Д.А. — № 4 Новикова Ю.С. — № 2

Новоселова Е.В. — № 4 Павловский А.А. — № 2 Пака В.Т. — № 2 Паничева Е.Д. — № 4 Погорелова А.В. — № 1 Расулова А.М. — № 2 Родионов А.А. — № 1 (2 статьи), 4 (4 статьи) Родионов М.А. — № 3 Романенков Д.А. — № 4 Рябченко В.А. — № 1, 2, 4 Савчук О.П. — № 2Салюк П.А. — № 3 Саушкина Д.Я. — № 4 Свергун Е.И. — № 4 Свиридов Р.К. — № 3 Сеин Д.В. — № 1 Сентябов Е.В. — № 1 Соловьев В.А. — № 3 Софьина Е.В. — № 4 Суетин Б.П. — № 4 Суслин В.В. — № 4 Суторихин И.А. — № 3, 4 Тепнин О.Б. — № 4 Тихонова Н.А. — № 2 Травкин В.С. — № 2 Феттер Г.В. — № 3 Филатов Н.Н. — № 2 (2 статьи) Филин К.Б. — № 4 (2 статьи) Хаймина О.В. — № 2 Цветков А.В. — № 1 Чубаренко Б.В. — № 2 Шаров А.Н. — № 2 Шеберстов С.В. — № 3 Шибанов Е.Б. — № 3 Шмакова М.В. — № 2 Шпилев Н.Н. — № 4 (4 статьи) Штрайхерт Е.А. — № 3 Яковчук М.С. — № 4