

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

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

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

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА

ТОМ 18, № 1
2025

**FUNDAMENTAL
AND APPLIED HYDROPHYSICS**

VOL. 18, No. 1
2025

<https://hydrophysics.spbrc.ru>

Учредители:
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА

Том 18 № 1 2025

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 23.03.2025 г. Дата выпуска в свет 31.03.2025 г. Формат 60 × 84¹/₈.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,95. Тираж 50 экз. Тип. зак. № 1923.

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

Founders:
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
SAINT-PETERSBURG RESEARCH CENTER
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

FUNDAMENTAL AND APPLIED HYDROPHYSICS

Vol. 18 No. 1 2025

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 ПИ № ФС77-69420 of 14.04.2017
Certificate of registration of the journal in the form of online media Series Эл № ФС77-83580 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: 23.03.2025. Issued: 31.03.2025. Format: 60 × 84¹/₈.

Digital printing. Printed sheets: 13.95. Circulation: 50 pcs. Order No. 1923.

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

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)
- Кортаев 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. Petersburg Marine 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

Фундаментальные вопросы гидрофизики

<i>Чаликов Д.В., Фокина К.В.</i> Прямая (фазо-разрешающая) модель поверхностных волн	8
<i>Фокина К.В.</i> Трёхмерная фазо-разрешающая модель поверхностных волн для конечной глубины	19
<i>Сергиевская И.А., Ермаков С.А., Лазарева Т.Н.</i> Модовая трансформация волн на поверхности жидкости, покрытой упругой пленкой конечной толщины	31
<i>Баханов В.В., Власов С.Н., Копосова Е.В.</i> Модуляционно-самофокусирующая неустойчивость гравитационно-капиллярных волн в широком интервале углов и частот	41

Гидрооптика

<i>Чурилова Т.Я., Скороход Е.Ю., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А.</i> Концентрация хлорофилла «а» и поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом в Черном море зимой (2018) и летом (2020)	53
<i>Корчёмкина Е.Н., Суслин В.В., Кудинов О.Б., Суторихин И.А., Кириллов В.В.</i> Коэффициент спектральной яркости вод Телецкого озера в августе 2023 г. и его связь с биооптическими характеристиками	66
<i>Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Кольцова Е.С., Коновалов Б.В., Дроздова А.Н., Пелевин В.В., Богатов Н.А., Чушнякова А.М., Кириллов А.Г.</i> Биооптические характеристики вод средней Волги по результатам натурных измерений 2023 г.	78

Техническая гидрофизика

<i>Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев Г.В., Ермошкин А.В.</i> Об особенностях течений в Волжском каскаде водохранилищ	92
---	----

История науки и техники в области гидрофизики

<i>Гришин М.Г., Собисевич А.В.</i> Участие советских учёных в гидрофизических исследованиях, проводимых в рамках мероприятий Международного геофизического года (1957–1958 гг.)	106
---	-----

CONTENTS

Fundamental issues of hydrophysics

<i>Chalikov D.V., Fokina K.V.</i> Direct (phase-resolving) model of surface waves	8
<i>Fokina K.V.</i> Three-dimensional phase-resolving surface wave model for finite depth	19
<i>Sergievskaia I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N.</i> Mode transformation of waves on the surface of a liquid covered by an elastic film of finite thickness	31
<i>Bakhanov V.V., Vlasov S.N., Kuposova E.V.</i> Modulation-self-focusing instability of gravity-capillary waves in a wide range of angles and frequencies	41

Hydrooptics

<i>Churilova T.Ya., Skorokhod E.Yu., Efimova T.V., Moiseeva N.A.</i> Chlorophyll “a” concentration and light absorption by colored dissolved organic matter in the black sea in winter (2018) and summer (2020)	53
<i>Korchemkina E.N., Suslin V.V., Kudinov O.B., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V.</i> Spectral reflectance coefficient of lake teletskoye in august 2023 and its relationship with bio-optical characteristics	66
<i>Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Leshchev G.V., Dobrokhotova D.V., Koltsova E.S., Kononov B.V., Drozdova A.N., Pelevin V.V., Bogatov N.A., Chushnyakova A.M., Kirillov A.G.</i> Bio-optical properties of the middle volga at 2023	78

Technical hydrophysics

<i>Dobrokhotova D.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Leshchev G.V., Ermoshkin A.V.</i> Peculiarities of currents in the volga reservoir cascade	92
--	----

The History of science and technics in hydrophysics

<i>Grishin M.G., Sobisevich A.V.</i> Soviet scientists’ participation in hydrophysical research conducted as part of the events of the international geophysical year (1957–1958)	106
---	-----

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-1

УДК 551.466.3

© Д. В. Чаликов^{1,2}, К. В. Фокина^{1*}, 2025

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

²Университет Мельбурна, 3010 Виктория, Австралия

*fokinakarina@yandex.ru

ПРЯМАЯ (ФАЗО-РАЗРЕШАЮЩАЯ) МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Статья поступила в редакцию 21.06.24, после доработки 05.01.2025, принята в печать 22.01.2025

Аннотация

Обсуждается место созданной в Санкт-Петербургском филиале ИО РАН численной модели поверхностных волн TRIDWAVE в вычислительной геофизической гидродинамике. Дается описание математической формулировки численной модели поверхностных волн в периодической области для бесконечной и конечной глубин. Главной особенностью модели является возможность переключения от подробной трёхмерной схемы к упрощённой двумерной схеме, которая ускоряет вычисления в 10–15 раз. Статистические характеристики результатов, воспроизводимых оригинальным и ускоренным вариантами модели, совпадают с высокой точностью. Дается описание структуры модели, взаимодействия её блоков, схемы запуска и возобновления счёта и контроля результатов. Описывается динамическая часть программы, осуществляющая решение на каждом шаге по времени и включающиеся по запросу блоки оперативной обработки и регистрации результатов. Описана система регистрации результатов, их состав, даны рекомендации по расширению выдачи. Даются рекомендации по организации обработки полученных результатов после окончания счёта.

Ключевые слова: потенциальные поверхностные волны, численное моделирование, ветровые волны, развитие волн, диссипация волн, спектр, Фурье трансформ метод, статистические характеристики волн

© D. V. Chalikov^{1,2}, K. V. Fokina^{1*}, 2025

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

²University of Melbourne, Victoria 3010, Australia

*fokinakarina@yandex.ru

DIRECT (PHASE-RESOLVING) MODEL OF SURFACE WAVES

Received 21.06.24, Revised 05.01.2025, Accepted 22.01.2025

Abstract

The place of the numerical model of surface waves TRIDWAVE, created in the St. Petersburg Branch of IO RAS, in computational geophysical fluid dynamics is discussed. A description of the mathematical formulation and numerical models of surface waves in the periodic domain for infinite depth is given. The main feature of the model is the ability to switch from a detailed three-dimensional scheme to a simplified two-dimensional scheme, which speeds up calculations by 10–15 times. The statistical characteristics of the results reproduced by the original and accelerated versions of the model coincide with high accuracy. A description is given of the structure of the model, the interaction of its blocks, the scheme for starting and resuming computations and monitoring the results. The dynamic part of the program is described, which carries out the solution at each time step and blocks of operational processing and recording of results that are activated upon request. The system for recording results, their composition is described, and recommendations for expanding the output are given. Recommendations are given for organizing the processing of the results obtained after the end of the calculation.

Keywords: potential surface waves, numerical modeling, wind waves, wave development, wave dissipation, spectrum, Fourier transform method, statistical characteristics of waves

Ссылка для цитирования: Чаликов Д.В., Фокина К.В. Прямая (фазо-разрешающая) модель поверхностных волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 8–18. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-1

For citation: Chalikov D.V., Fokina K.V. Direct (Phase-Resolving) Model of Surface Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025; 18(1):8–18. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-1

1. Введение

Понятие «фазо-разрешающая модель» возникло, по-видимому, как альтернатива волновых моделей, в которых рассматриваются только амплитуды мод или плотность потенциальной энергии и полностью отсутствуют понятие поля скорости и формы поверхности. В действительности, сходство между этими типами моделирования ограничивается общим объектом исследования — волнами. Поэтому термин «фазо-разрешающее моделирование» надо считать неудачным и оставить в употреблении традиционное название «прямое моделирование» (direct modeling). Строго говоря, можно обойтись и без добавления «прямое», поскольку к собственно моделированию в геофизической гидродинамике принято относить только работы, основанные на исходных, а не на сильно упрощённых подходах. Прямое моделирование волн подразумевает воспроизведение их движения в терминах первичных переменных — скорости и давления, или в потенциальном приближении — потенциала и формы поверхности. Понятие моды или плотности энергии, используемые в упрощённых подходах, далеко не универсальны, потому что амплитуды линейных мод неустойчивы, а плотности энергии недостаточно для того, чтобы воссоздать физическую поверхность. Прямая модель волн при условии периодичности может использовать преобразование Фурье для построения численной схемы и для представления результатов, но при этом модам не придаётся физического смысла.

В статье рассматривается структура и основные особенности модели TRIDWAVE (описание модели представлено ниже в разделе 4 или в [2], главе 12 и в [3]), предназначенной для моделирования эволюции и структуры трёхмерных волн. Для того, чтобы избежать повторений, рекомендуем читателям рассматривать в качестве введения к этой статье работу [1]. В указанной статье перечислены многие виды моделирования и даны все необходимые ссылки. Настоящая статья посвящена методу реализации подхода к моделированию поверхностных волн, который разрабатывался Д.В. Чаликовым на протяжении последних 20-ти лет. В этой статье, в отличие от предыдущих, основное внимание уделено технологии моделирования. Такой подход оправдан только по отношению к хорошо сформулированным и алгоритмически простым задачам (например, к DNS моделированию). Поверхностные волны даже в потенциальном приближении к таковым не относятся потому, что волновые движения сопровождаются процессами намного более сложными, чем вся адиабатическая теория поверхностных потенциальных волн (например, обрушение волн или их взаимодействие с ветром). Математическое моделирование адиабатических потенциальных периодических волн является хорошо сформулированной и сравнительно простой задачей. Проблема в том, что таких волн нет в природе: реальные волны трансформируются далеко не в потенциально адиабатической манере.

Мы видели нашу задачу в том, чтобы создать модель потенциальных периодических волн, которая может служить «полигоном» для дальнейших исследований. Основой такой модели является адиабатическая модель, которая должна быть достаточно точной для того, чтобы возникающие неполадки и странности результатов можно было бы отнести к различным нововведениям, но не к её основе. Модель существенно использует свойство потенциальности морских волн и основана на периодичности. Последнее свойство предполагает, что исследуемая область является небольшой частью более обширной области, достаточно малой для того, чтобы условия периодичности выполнялись. Отказ от периодичности позволяет учитывать реальную конфигурацию области. Но в этом случае возникает другая, гораздо более сложная задача, использующая другие методы и технологию.

В настоящее время прямое моделирование волн ограничено предположением о потенциальности, что позволяет избежать трудностей и неопределённостей, связанных с турбулентностью. Реальные волны не полностью потенциальны, в частности, потенциальное поле скорости взаимодействует с вихревыми движениями (см. [2], Глава 11). В настоящее время предполагается, что этот процесс вторичен и не оказывает значительного влияния на динамику волн.

Эксплуатировать чисто адиабатическую модель было бы неинтересно. Даже правомерность интеграла Хассельманна [4] трудно было бы проверить, так как при его расчёте с моделью для осреднения по фазам потребовалось бы длительное интегрирование, в течение которого спектр не остаётся постоянным. Впрочем, результаты такого сравнения и без того неопределённые, поскольку в интеграле Хассельманна учитываются только взаимодействия 4-го порядка, тогда как в реальности и в полной модели между собой взаимодействуют все моды.

Фазо-разрешающие модели используют высокое разрешение, что ещё больше затрудняет сравнение с алгоритмами для интеграла Хассельманна, которые применимы лишь для малого разрешения. Для «оживления» адиабатической модели, в неё вставлены алгоритмы, описывающие приток энергии от ветра и диссипацию за счёт опрокидывания.

Модель целесообразно применять в двух направлениях. Основное из них — развитие алгоритмов, рассчитывающих физические процессы в волновом поле, не описываемые исходными уравнениями, из которых наиболее важные — взаимодействие с атмосферой и диссипация волновой энергии. Второе направление, успешность которого зависит от надёжности результатов, полученных в первом направлении — применение модели для исследовательских целей, например, для исследования статистических свойств волнового поля.

2. Структура модели

Архитектура модели непрерывно изменялась и совершенствовалась. Критериями для выбора усовершенствований были соображения удобства использования и введения расширений. Модель включает следующие основные компоненты: 1) генерация начальных условий и механизм возобновления счёта; 2) алгоритмы интегрирования уравнений по времени, включая диагностические расчёты поверхностной вертикальной скорости; 3) алгоритмы оперативного расчёта статистической информации, требующие высокого разрешения по времени; 4) алгоритмы эпизодической записи мгновенной информации типа 1D, 2D или 3D полей и интегралов; 5) вспомогательные программы типа FFT (быстрое преобразование Фурье).

Структура модели показана на рис. 1. Весь период вычислений в модели разделён на одинаковые по числу временных шагов части. Каждая часть записывается в отдельный файл («рестарт»). Информация из предыдущего «рестарта» является начальными условиями для следующего. Это позволяет при необходимости возобновлять счёт с нужного момента времени. Исходя из этого, счёт на заданное число шагов в модели начинается с генерации начальных условий или чтения «рестарта» для продолжения счёта. Основной и очень компактный блок реализует четырёхэтапный шаг по времени по схеме Рунге-Кутты. На каждом этапе вызывается блок расчёта вертикальной скорости на поверхности. Для 3D варианта модели W3 (варианты окаймлены пунктирной линией) решается 3D эллиптическое уравнение для потенциала скорости, представленное как уравнение Пуассона с пересчитываемой правой частью до достижения требуемой точности, а далее вычисляется 2D поле вертикальной скорости, входящее в прогностические уравнения для возвышения и поверхностного потенциала. Если в настройке программы задана двумерная формулировка задачи, блок Рунге-Кутты обращается прямо к расчёту 2D поля поверхностной вертикальной скорости (модель W2), а массивные блоки из 3D алгоритма не включены в работу. В целом, 2D вариант оказывается в 12–15 раз быстрее, чем 3D. Заметим, что легко ввести чередование во времени 2D и 3D алгоритмов. Эта версия нами пока не проверялась.

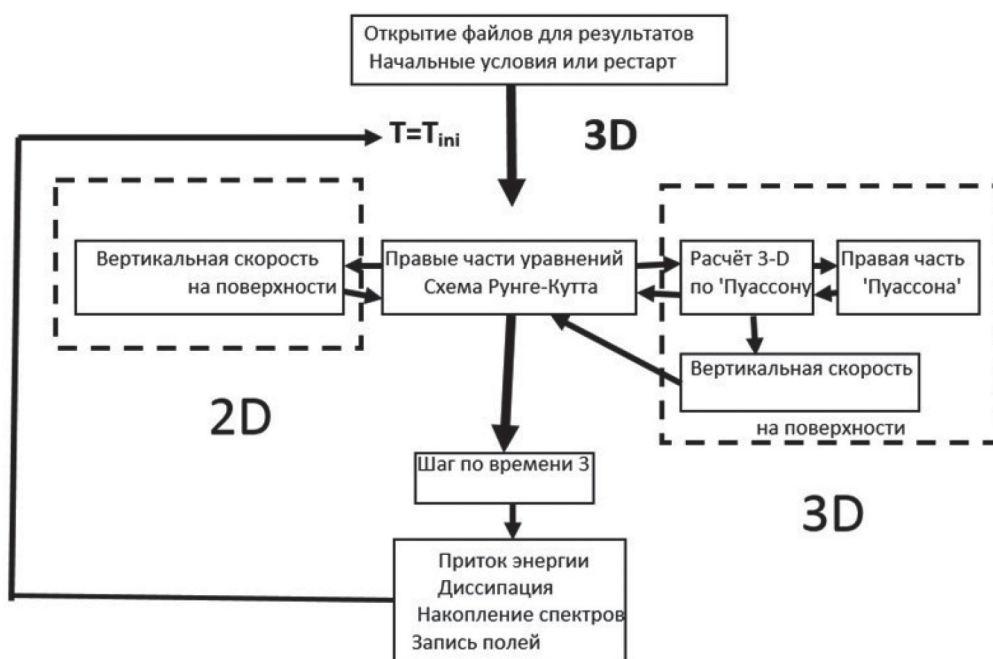


Рис. 1. Схема TRIDWAVE модели

Fig. 1. The TRIDWAVE model scheme

Завершающий шаг по времени происходит по окончании процедуры Рунге-Кутты. Заметим, что вычисления неадиабатических эффектов (притока энергии и диссипации) выведены из алгоритмов вычисления правых частей в схеме Рунге-Кутты. Это сильное упрощение позволило разъединить сложные и точные вычисления дифференциальных правых частей и расчёты, реализующие физические параметризацию. Правомомерность этого подхода была тщательно проверена многократными вычислениями. В одном блоке, вычисляющем приток энергии и диссипацию по флагу, происходит накопление данных об одномерных спектрах притоков и диссипации энергии, а также следующих характеристик: (1) уровень η ; (2) $\eta_x^2 + \eta_y^2$; (3) лапласиан поверхности $\Delta\eta$; (4) полная вертикальная скорость на поверхности $\phi_\zeta(0)$; (5) нелинейная компонента вертикальной скорости на поверхности $\tilde{\phi}_\zeta(0)$; (6) давление на поверхности p ; (7) тангенциальное трение на поверхности τ_0 ; (8) производная от вертикальной скорости $\phi_{\zeta\zeta}$; (9) крутизна поверхности $k\eta$; (10) линейная компонента вертикальной скорости $\bar{\phi}_\zeta(0)$; Здесь же помещён алгоритм поддержания квазистационарного режима. Этот механизм обеспечивает неизменность полной энергии, но, разумеется, не исключает потока энергии по спектру и дауншифтинг (приток энергии в область малых волновых чисел). В этот блок можно добавить расчёт одномерных спектров любых характеристик. Необходимость такой структуры объясняется сильной изменчивостью мгновенных спектров, при которой многие закономерности проявляются только после осреднения по времени. В режиме счёта с заданной периодичностью выдаётся информация, необходимая для заключения о целесообразности продолжения счёта.

Вычисления на длительные периоды целесообразно разделять на короткие отрезки времени, длина которых определяется скоростью компьютера и принятым разрешением. При шаге по времени $\Delta t = 0,01$ мы использовали число шагов $N_t = 1000 \div 10000$. Обычно задача генерирует очень большие объёмы информации, что следует учитывать при планировании эксперимента. При неразумном использовании модели расчёты могут заполнить сколь угодно большую память. Многократная запись «рестарта» позволяет восстанавливать любую информацию в режиме «эмуляции», т. е. счёте с полной моделью на один или любое заданное число шагов с оперативной генерацией и обработкой основных и дополнительных данных или с целью записи для последующей обработки.

3. Описание переменных

Все переменные в модели представлены в двух видах: в виде массива коэффициентов Фурье с размерностью $(-M_x : M_x, -M_y : M_y)$ для двумерных полей и $(-M_x : M_x, -M_y : M_y, 0 : L)$ для трёхмерных полей (L — число уровней, не считая поверхности) и соответствующих сеточных массивов: (N_x, N_y) , (N_x, N_y, L) , где $N_x = 4M_x$, $N_y = 4M_y$. В данной конфигурации параметры M_x и M_y должны быть равны целой степени 2 (т. е. их значение равно 2^n). Сеточные массивы определяются обратным преобразованием Фурье:

$$G(\xi, \eta) = \sum_{k=-M_x}^{k=M_x} \sum_{l=-M_y}^{l=M_y} F_{k,l} \Theta_{k,l}, \quad (1)$$

где $\Theta_{k,l}$ — базисные функции преобразования Фурье:

$$\Theta_{k,l} = \begin{cases} \cos(k\xi + l\eta) & -M_x \leq k \leq M_x & -M_y \leq l \leq 0 \\ \cos(k\xi) & -M_x \leq k \leq 0 & l = 0 \\ \sin(k\xi) & 0 \leq k \leq M_x & l = 0 \\ \sin(k\xi + l\eta) & -M_x \leq k \leq M_x & 0 \leq l \leq M_y \end{cases}. \quad (2)$$

В большинстве случаев Фортран позволяет оперировать с массивами как со скалярными переменными. Размер сеточных полей почти в 4 раза больше размеров полей Фурье, поэтому целесообразно проводить линейные операции и хранить результаты преимущественно в терминах Фурье переменных. Нелинейные операции, разумеется, проводятся в сеточном пространстве в соответствии с правилами Фурье-трансформ метода. Для всех переменных представление Фурье возобновляется на каждом шаге. При этом, модам Фурье не приписывается физического смысла. Наоборот, решается континуальная задача эволюции поверхности $\eta(\xi, \eta, \tau)$ и поверхностного потенциала $\phi(\xi, \eta, \tau)$ в физическом пространстве и времени на сетке с заданным разрешением. Моды Фурье используются для экономии в линейных вычислениях, в алгоритмах параметризации физических процессов (например, обмена энергией между волнами и ветром) и для представления спектральных результатов. Континуальный подход, в частности, предполагает, что допускаются все возможные нелинейные взаимодействия между всеми модами. Начальные условия задаются в виде

совокупности амплитуд линейных мод поверхности и поверхностного потенциала, например, на основе линейной теории. Этот набор может, в частности, задавать в начальных условиях нелинейные объекты, например, суперпозицию волн Стокса.

4. Дифференциальные уравнения

4.1. Трёхмерная формулировка

Используется нестационарная неортогональная система координат:

$$\xi = x, \quad \vartheta = y, \quad \zeta = z - \eta(\xi, \vartheta, \tau), \quad \tau = t, \quad (3)$$

где функция $\eta(x, y, t) = \eta(\xi, \vartheta, \tau)$ описывает форму поверхности:

$$\eta(\xi, \vartheta) = \sum_{-M \leq k, l \leq M} \eta_{k,l} \Theta_{k,l}. \quad (4)$$

Трёхмерные уравнения потенциальных волн в системе координат (3) [2, глава 12] принимают вид:

$$\eta_\tau = -\eta_\xi \varphi_\xi - \gamma^2 \eta_\vartheta \varphi_\vartheta + (1 + \eta_\xi^2 + \gamma^2 \eta_\vartheta^2) \Phi_\zeta, \quad (5)$$

$$\varphi_\tau = -\frac{1}{2} (\varphi_\xi^2 + \gamma^2 \varphi_\vartheta^2 - (1 + \eta_\xi^2 + \gamma^2 \eta_\vartheta^2) \Phi_\zeta^2) - \eta - p_0, \quad (6)$$

$$\Phi_{\xi\xi} + \gamma^2 \Phi_{\vartheta\vartheta} + \Phi_{\zeta\zeta} = 2\eta_\xi \Phi_{\xi\zeta} + 2\gamma^2 \eta_\vartheta \Phi_{\vartheta\zeta} + (\eta_{\xi\xi} + \gamma^2 \eta_{\vartheta\vartheta}) \Phi_\zeta - (\eta_\xi^2 + \gamma^2 \eta_\vartheta^2) \Phi_{\zeta\zeta}, \quad (7)$$

где Φ — трёхмерный потенциал скорости, p_0 — внешнее давление, φ — значение потенциала скорости Φ на поверхности $\zeta = 0$. Уравнения (5)–(7) инвариантны к преобразованию масштаба длины, поэтому они записаны в безразмерной форме с использованием следующих масштабов: длины L ($2\pi L$ — размерная длина области), времени $L^{1/2} g^{-1/2}$, потенциала скорости $L^{3/2} g^{1/2}$ (g — ускорение свободного падения). Давление p_0 отнесено к единице плотности воды, его масштаб равен Lg .

Уравнения (5) и (6) относятся к свободной поверхности. Уравнения формально выглядят как двумерные, однако они содержат вертикальную производную от потенциала Φ_ζ , для расчёта которой приходится решать трёхмерное эллиптическое уравнение (7) с нижним граничным условием $\Phi_\zeta(\zeta \rightarrow -\infty) = 0$ и верхним граничным условием $\Phi(\zeta = 0) = \varphi$.

Численное решение существенно упрощено предположением (см. [3]), что потенциал скорости может быть точно представлен суммой аналитической компоненты $\bar{\Phi}(\xi, \vartheta, \zeta)$, ($\bar{\varphi} = \bar{\Phi}(\xi, \vartheta, 0)$) и нелинейного возмущения $\tilde{\Phi}(\xi, \vartheta, \zeta)$, ($\tilde{\varphi} = \tilde{\Phi}(\xi, \vartheta, 0)$). Уравнение для компоненты потенциала скорости $\tilde{\Phi}$ решается на основе трехдиагонального матричного алгоритма. Алгоритм обобщён на трёхмерный случай на основе Фурье-представления по продольным координатам ξ и ϑ . Уравнение решается итерациями с последовательной коррекцией правой части. Начальные значения функции Φ задаются на основе линейной теории. Точность решения контролируется максимальной невязкой $\varepsilon \sim (10^{-5} - 10^{-6}) \|\eta\|$ ($\|\eta\|$ — норма для возмущения поверхности). Детали численной схемы и результаты всесторонней проверки модели можно найти в [2].

Этот вариант модели назван FWM (*Full Wave Model*, FWM).

4.2. Двумерная формулировка

Все трёхмерные модели, основанные на полных уравнениях, имеют общее ограничение, т. е. низкую вычислительную эффективность. Работа с такими моделями даже со скромным разрешением превращается в бесконечное ожидание результатов. Это свойство моделей замедляет их совершенствование, в частности, разработку схем параметризации физических процессов, поскольку такая работа требует многократного повторения прогонов.

Недавно в ряде наших работ (см., например, [3, 5]) была предпринята попытка разработать новый подход к моделированию двумерных периодических волновых полей. Основная идея схемы вытекает из представления потенциала скорости как суммы линейных и нелинейных составляющих, предложенного в [2]. Решение для линейной составляющей известно; следовательно, нелинейная составляющая должна быть вычислена с помощью уравнения Пуассона с нулевым граничным условием на поверхности. Такой подход предлагает новый способ упростить вычисления, рассматривая двумерное уравнение Пуассона на поверхности. Уравнение, которое можно рассматривать как дополнительное поверхностное условие, содержит как первую, так и вторую вертикальные производные потенциала. Таким образом, система уравнений остаётся

незамкнутой. Эмпирически было обнаружено, что эти переменные тесно связаны друг с другом. Линейная зависимость между первой и второй вертикальной производной была многократно проверена. Было показано, что использование таких гипотез приводит к формулировке замкнутой системы уравнений, которая позволяет получить результаты, близкие к тем, которые получены с помощью полной волновой модели.

Подробный вывод двумерного уравнения приведён в [3]. Полученная система двумерных уравнений для моделирования эволюции многомодового волнового поля включает стандартные эволюционные кинематические и динамические условия поверхности и дополнительное диагностическое условие для расчёта вертикальной скорости поверхности:

$$\eta_\tau = -\eta_\xi \varphi_\xi - \eta_\eta \varphi_\eta + (1+s)w, \quad (8)$$

$$\varphi_\tau = -\frac{1}{2}(\varphi_\xi^2 + \varphi_\eta^2 - (1+s)w^2) - \eta - p, \quad (9)$$

$$\tilde{w} = \frac{A(2(\eta_\xi w_\xi + \eta_\eta w_\eta) + \Delta\eta w - s\bar{w}_\zeta)}{1+s}, \quad (10)$$

здесь $\Delta = \eta_{\xi\xi} + \eta_{\eta\eta}$ — лапласиан возвышения поверхности η , $w = \bar{w} + \tilde{w}$ — полная вертикальная скорость. Линейная компонента ($\bar{w} = \bar{\varphi}_\zeta$) вычисляется аналитически из уравнения $\bar{\varphi}_{\xi\xi} + \bar{\varphi}_{\eta\eta} + \bar{\varphi}_{\zeta\zeta} = 0$, которое решается с граничными условиями $\bar{\varphi}(\zeta=0) = \varphi$ и $\bar{\varphi}_\zeta(\zeta \rightarrow \infty) \rightarrow 0$. Нелинейная компонента ($\tilde{w}$) рассчитывается по уравнению (10).

Коэффициент A в (10) рассчитывается по формуле:

$$A = \sigma F(\mu), \quad (11)$$

где $\sigma = \left((\eta - \bar{\eta})^2 \right)^{1/2}$ — среднеквадратичное отклонение возвышения η , и μ — параметр

$$\mu = \sigma \sigma_L, \quad (12)$$

где $\sigma_L = \left((\Delta\eta - \Delta\bar{\eta})^2 \right)^{1/2}$ — среднеквадратичное отклонение горизонтального лапласиана высоты $\Delta\eta$. Функция F аппроксимируется следующим образом:

$$F = \frac{A_0 + A_1 \mu}{A_2 + \mu}, \quad (13)$$

где $A_0 = 0,0524$, $A_1 = 1,193$, $A_2 = 0,0053$. Коэффициенты в (13) были найдены на основе многочисленных численных экспериментов с FWM и эмпирического (в вычислительном смысле) выбора безразмерных переменных и численных параметров. Этот вариант модели назван эвристической волновой моделью (*Heuristic Wave Model*, HWM).

Численная схема основана на методе преобразования Фурье с использованием представлений переменных коэффициентов Фурье и сеточных переменных; число степеней свободы в сеточном пространстве в четыре раза превышает число степеней свободы в пространстве Фурье.

Уравнение (10) представлено в форме, удобной для итераций. Оно также решается с помощью метода Фурье. Поскольку итерации начинаются с начального условия, взятого из предыдущего временного шага, типичное число итераций равно двум и редко превышает четыре. Упрощённая модель даёт почти те же статистические результаты, что и полная модель. Легко видеть, что предложенные выше уравнения полностью аналогичны полным уравнениям, с одним исключением: небольшая нелинейная поправка к общей вертикальной скорости вычисляется не из трехмерного уравнения Пуассона, а из простого двумерного уравнения (10), что увеличивает скорость решения задачи в 15–20 раз. Можно добавить, что упрощённая модель имеет гораздо более простую структуру, чем FWM, и легко программируется.

Таким образом, алгоритмы отличаются только способом вычисления вертикальной скорости. В остальных моделях были полностью идентичны, что позволило их объединить в одном пакете. Блоки вычисления двумерного поля вертикальной скорости окаймлены пунктирными линиями на рис. 1 (справа — для FWM, слева — для HWM). Выбор 3D или 2D алгоритма задаётся перед счётом. Переключение от одного режима к другому возможно также при возобновлении счёта.

Успешность двумерной формулировки трёхмерной задачи была подтверждена многочисленными свидетельствами совпадения многих статистических характеристик и даже прямых (point-to-point) сопоставлений двумерных полей. Не лишним здесь будет приведение дополнительных данных этого рода.

На рис. 2 дано сопоставление вертикальной скорости (т. е. объекта параметризации, различающей 3D и 2D подходы) рассчитанной по уравнению (10) и формулам (11)—(13). Жирная линия показывает линейную зависимость между w_2 и w_3 :

$$w_2 = b_0 + b_1 w_3, \quad (14)$$

где $b_0 = -(3 \pm 2) \cdot 10^{-5}$, $b_1 = 0,990 \pm 5 \cdot 10^{-4}$. Дисперсия между аппроксимацией (13) и исходными данными составила $1,6 \cdot 10^{-4}$. Данные на рисунке получены интегрированием с тремя вариантами модели TRID-WAVE с разными параметрами на длительные периоды. Общее число пар (w_3, w_4) было равно $\approx 1,55 \cdot 10^8$. Очевидно, что полученные данные доказывают очень надёжное согласование значений вертикальной скорости, рассчитанных полной и упрощённой моделями.

Сопоставление результатов расчётов по двум моделям показано на рис. 3 на примере вероятностей возвышения поверхности η и вертикальной скорости w (т. е. объекту параметризации в W2). Использовались результаты длительного интегрирования в режиме, близком к стационарному (при сохранении полной энергии). Как видно, распределение вероятностей полученные по двум разным моделям очень близки друг к другу. Несовпадение кривых заметно лишь для экстремальных значений.

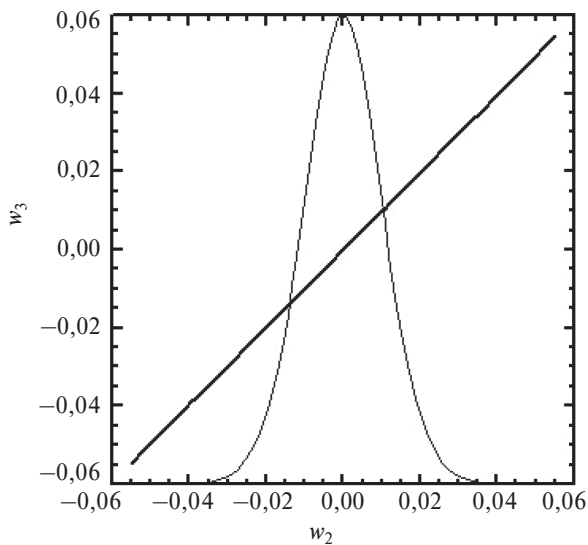


Рис. 2. Сопоставление значений вертикальной скорости на поверхности, рассчитанных по 3D (w_3) 2D (w_2) алгоритмам. Жирная линия — линейная аппроксимация зависимости, тонкая линия — распределение вероятности для w_3

Fig. 2. Comparison of surface vertical velocity calculated with 3D (w_3) 2D (w_2) algorithms. The thick line is a linear approximation of the dependence, the thin line is the probability distribution for w_3

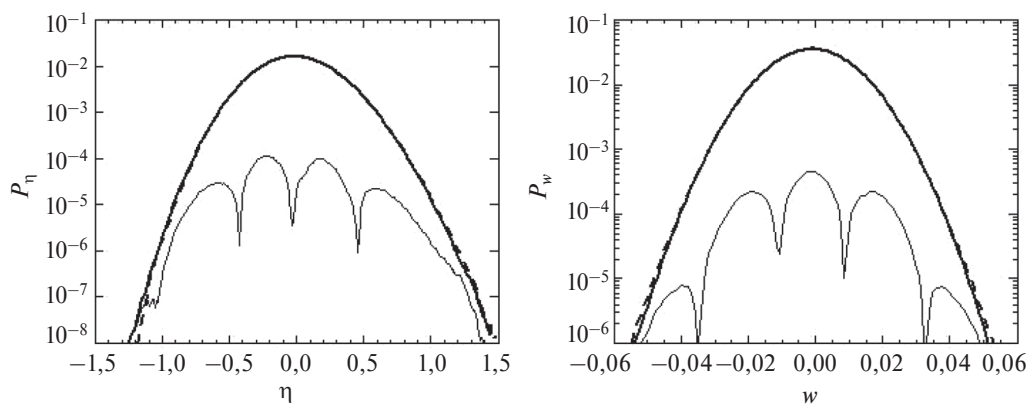


Рис. 3. Распределение вероятностей возвышения η и вертикальной скорости w . Сплошные кривые — расчёт по модели W3, пунктирные — по модели W2. Кривые для этих моделей практически совпадают, поэтому абсолютная разность между ними показана тонкой кривой

Fig. 3. Probability distribution of surface elevation η and vertical velocity w . Solid curves are calculations done with W3 model, dashed lines are calculations done with W2 model. The curves for these models are almost identical, so the absolute difference between them is demonstrated as a thin curve

5. Приток энергии к волнам и диссипация

Описание притока энергии к волнам основано на теории Майлза [6], согласно которой для каждой моды комплексные амплитуды поверхности $\bar{\eta}_{k,l}$ связаны с комплексными амплитудами поверхностного давления $\bar{p}_{k,l}$ линейным соотношением:

$$\bar{p}_{j,k} = \bar{\beta}_{j,k}(\Omega) \bar{\eta}_{j,k}, \quad (15)$$

где $\bar{\beta}_{k,l}$ — комплексный коэффициент пропорциональности,

$$\Omega_{k,l} = \frac{U(\lambda_{k,l} / 2)}{c_{k,l}} \cos(\psi_{k,l}), \quad (16)$$

$(-M_x \leq k \leq M_x, -M_y \leq l \leq M_y)$ — номера мод в Фурье-пространстве, $\lambda_{k,l} = 2\pi / k_{k,l}$ — длина волны, $k_p = (k^2 + l^2)^{1/2}$, $c_{k,l} = k_{k,l}^{-1/2}$ — фазовая скорость моды, $\psi_{k,l} = \arctg\left(\frac{l}{k}\right)$ — угол между направлением моды и направлением ветра.

Подробное описание этого метода дано в [2]. Несмотря на простоту соотношения (15), его конкретизация и применение оказываются довольно сложными. Функция $\bar{\beta}$ должна быть определена на основе одновременных измерений скорости ветра, регистрации поверхностного давления и регистрации поверхности. Понятно, измерения давления на быстро меняющейся поверхности — технически трудная задача. Основная проблема состоит в том, что давление содержит несколько компонент разного происхождения. Во-первых, в сдвиговом потоке существует широкий спектр турбулентных пульсаций давления. В течении над искривлённой движущейся поверхностью возникают флуктуации давления, порождённые возмущениями поверхности. Нелинейность развивает дополнительные моды давления, которые прямо не связаны с поверхностью. Специфика пограничного слоя над волнами состоит в том, что амплитуды мод поверхностного давления, коррелированные с модами поверхности, на 1–2 порядка меньше, чем турбулентные и не связанные прямо с волнами амплитуды давления, поэтому встаёт задача извлечения требуемого слабого сигнала с наложенным сильным шумом. Наиболее перспективным методом генерации подходящих данных является длительное численное моделирование волнового пограничного слоя над многомодовой волновой поверхностью (см. пример в [7]). Функция β показана на рис. 4. Функция определена в массовых расчётах структуры пограничного слоя с помощью объединённой модели пограничного слоя (описываемого уравнениями Рейнольдса) и модели нелинейных волн. Обе записаны в конформной системе. Заметим, что квадратичный рост мнимой части функции β (сплошная кривая) наблюдается лишь в сравнительно узком интервале ($1 < \Omega < 6$). Линейный рост β — функции при $\Omega > 6$ ответственной за передачу энергии к модам установлен вполне надёжно.

Зависимость β от Ω аппроксимирована кусочно-полиномиальной функцией:

$$\begin{aligned} \beta_{-k} &= -0,01055 + 0,199\Omega_k + 0,0098\Omega_k^2 + 0,00019\Omega_k^3 & \Omega \leq -1 \\ \beta_{-k} &= -0,05 + 0,1\Omega_k - 0,05\Omega_k^2 & -1 < \Omega \leq 1 \\ \beta_{-k} &= -0,0385 + 0,055\Omega_k - 0,0147\Omega_k^2 + 0,00496\Omega_k^3 & 1 < \Omega \leq 8 \\ \beta_{-k} &= -4,329 + 0,794\Omega_k & 8 < \Omega \\ \beta_k &= -0,5068 + 0,6648\Omega_k - 0,2097\Omega_k^2 & -1,5 \geq \Omega < 4,7 \\ \beta_k &= 0,647 + 1,778\Omega_k & \Omega < 1,5 \\ \beta_k &= 3,1507 - 1,0959\Omega_k & \Omega \geq 4,7 \end{aligned} \quad (17)$$

где положительный индекс относится к действительной части функции, а отрицательный — к мнимой.

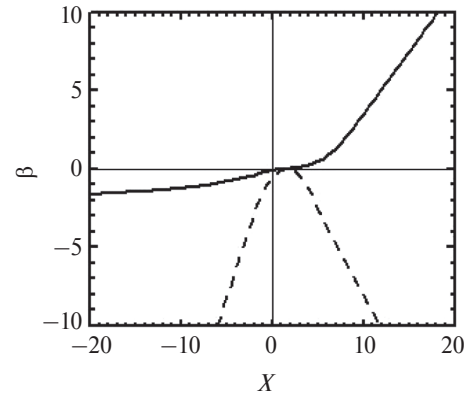


Рис. 4. Мнимая (сплошная кривая) и действительная (пунктир) части функции β

Fig. 4. Imaginary (solid line) and real (dashed line) parts of β -function

Было бы рано считать, что проблема, описания обмена энергией и импульсом между волнами и ветром, полностью решена. Тем не менее, для её решения имеется солидный базис в виде теории Майлза, которая оказалась удивительно способной к обобщениям. Важно, что формулировка этого процесса дано в рамках потенциальной теории, что нельзя сказать о не менее важном явлении — диссипации волн.

Рост волновых амплитуд на высоких волновых числах создаёт участки с очень высокой крутизной поверхности и быстро вызывает вычислительную неустойчивость. Это явление, хорошо известное в вычислительной гидродинамике, устраняется использованием высокоселективных фильтров, имитирующих нелинейную вязкость. Для сохранения устойчивости в правые часть уравнений (5) и (6) вводятся дополнительные члены:

$$\frac{\partial \eta_{k,l}}{\partial \tau} = E_{k,l} - \mu_{k,l} \eta_{k,l}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \varphi_{k,l}}{\partial \tau} = F_{k,l} - \mu_{k,l} \varphi_{k,l}, \quad (19)$$

(E_k и F_k — Фурье амплитуды правых частей уравнений (5) и (6). Коэффициенты μ_k равны нулю внутри эллипса с полуосями aM_x и aM_y , линейно по $|k|$ растут до значения c_M на эллипсе с полуосями M_x и M_y и сохраняют это значение вне этого эллипса (вполне очевидные но громоздкие формулы для коэффициентов $\mu_{k,l}$ опущены). В расчётах могут быть приняты значения: $a = 0,50-0,75$, $c_M = 0,01-0,1$.

Главным механизмом диссипации волн является их обрушение (опрокидывание). Многочисленные наблюдательные данные об обрушении пока не оформились в виде конкретных рекомендаций для формулировки алгоритма. Поэтому в модели процесс опрокидывания волн рассматривается как «вязкая» диссипация потенциальной и кинетической энергий, представленными возвышением поверхности и поверхностным потенциалом скорости. Моделирование показывает, что неустойчивость, сходная с обрушением возникает, когда поверхность достигает чрезмерной крутизны или кривизны. Само явление обрушения, связанное с перемещением некоторого объёма воды, частично смешанной с воздухом, разумеется не описывается в рамках потенциальной теории. Такие явления зарождаются и при интегрировании полных уравнений, что приводит к остановке вычислений. Вопрос состоит в том насколько реалистично модель способна приблизиться к начальной фазе неустойчивости. Опыт работы с полными моделями позволяет надеяться, крутизна $\partial \eta / \partial x$ или $\partial \eta / \partial y$ может превышать $\approx 1,2$. Ещё более чувствительным оказался лапласиан поверхности $\Delta \eta$, локальное значение перед опрокидыванием может превышать значения $\Delta \eta \approx 120-150$. Поскольку остановка счёта нежелательна, дальнейшее увеличение крутизны надо предотвращать.

Описание обрушения в прямом моделировании должно удовлетворять трём условиям: (1) предотвращать вычислительную неустойчивость, связанную с опрокидыванием; (2) реалистично описывать потери локальной потенциальной и кинетической энергии; (3) сохранять объём. Параметризация обрушения основана на локальном диффузионном операторе с подходящим коэффициентом диффузии. Довольно много схем такого рода было исследовано, и в конечном итоге была выбрана следующая схема, сформулированная в физическом пространстве:

$$\eta_\tau = E_\eta + J^{-1} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} B \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \vartheta} B \frac{\partial \eta}{\partial \vartheta} \right), \quad (20)$$

$$\varphi_\tau = F_\varphi + J^{-1} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} B \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \vartheta} B \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} \right), \quad (21)$$

где E_η и F_φ — правые части уравнений (5) и (6), включающие члены, введённые в (18) и (19), B — коэффициент диффузии. В первых вариантах схемы предполагалось, что коэффициент диффузии B зависит от локального уклона поверхности, но такая схема оказалась ненадёжной, т. е. алгоритм не улавливал все случаи обрушения, что приводило к неустойчивости. Намного более универсальной оказалась схема, основанная на значениях локальной кривизны поверхности, характеризуемой лапласианом $\Delta \eta$:

$$B = \begin{cases} C_b \delta |\Delta \eta| & \Delta \eta < \Delta_{cr} \eta \\ 0 & \Delta \eta > \Delta_{cr} \eta \end{cases}, \quad (22)$$

где $\delta = (\Delta \xi \cdot \Delta \vartheta)^{1/2}$ и $\Delta_{cr} \eta$ — параметры в интервалах: $C_b = 10^{-3} \div 10^{-4}$, $\Delta_{cr} \eta = -120 \div -80$. Отрицательное значение критической крутизны предполагает, что обрушение происходит преимущественно в районе гребней. Алгоритмы (18), (19) и (20)–(22) не изменяют объём и понижают кинетическую и потенциальную энергию волн.

Возникновение вычислительной неустойчивости обычно сигнализирует о том, что диссипация не может справиться с чрезмерно большой крутизной или кривизной поверхности. Алгоритмы (18), (19) и (20)–(22) способны полностью предотвратить опрокидывание и прекращение счёта, но может оказаться, что при заданном наборе параметров a , c_m , C_b , $\Delta_{cr}\eta$ диссипация слишком велика и энергия оказывается меньше, чем ожидалось. В этом, скорее типичном, случае значения параметров приходится подбирать. Схема параметризации для опрокидывания основана на противоречивой концепции поддержания устойчивости счёта при максимальном приближении к опрокидыванию волн. Сходная ситуация возникает при работе с другими гидродинамическими моделями, например, при LES (Large Eddy Simulation) [8] моделировании. Уровень энергии наиболее чувствителен к параметрам c_m и C_b . При подборе параметров целесообразно использовать данные о скорости роста энергии от разгона, изученные в проекте JONSWAP [9].

6. Заключение

В статье дано краткое описание структуры и основных компонент модели TRIDWAVE, предназначенной для моделирования многомодового волнового поля в квазистационарном или в развивающемся режиме с учётом притока энергии и диссипации. Создание модели на основе более или менее простых уравнений потенциальной гидродинамики оказалось непростым делом. Когда модель начала оживать, стало ясно, что она может оказаться, по крайней мере на располагаемых нами компьютерах, почти бесполезной, из-за крайне малой скорости вычислений. Решительный сдвиг произошёл, когда было введено разделение потенциала скорости на формально линейную часть и нелинейную добавку. Это представление точно и не использует никаких предположений. Преимущество такого представления состоит в том, что нелинейная поправка оказывается гораздо меньше линейной составляющей, поэтому её вычисление происходит быстрее. Решение трёхмерного уравнения для потенциала скорости осуществляется с единственной целью — для вычисления двумерного поля вертикальной скорости на поверхности. Решение это должно быть достаточно точным, для чего требуется довольно высокое разрешение по вертикали с сгущением сетки у поверхности. Новая схема оказалась эффективнее в 2–3 раза, чем схема, основанная на первичных уравнениях. После введения двухкомпонентного представления потенциала скорость вычислений всё же оказалась низкой. Далее была предпринята попытка ускорения вычислений за счёт введения нового алгоритма расчёта вертикальной скорости на поверхности. Это оказалось возможным благодаря эмпирически найденной тесной связи между первой и второй в вертикальных производных нелинейной компоненты потенциала у поверхности. (Не исключено, что этот факт может найти теоретическое обоснование, по крайней мере, в приближении малой амплитуды.) В результате, в новой схеме полностью отпала необходимость использовать трёхмерное уравнение для потенциала, на решение которого уходит 90 % вычислительного времени.

В предлагаемом варианте численной модели предусмотрено использование обеих схем решения, переход между которыми осуществляется значением одного внешнего параметра. Если в распоряжении специалиста имеется достаточно быстрый компьютер, он может полностью отказаться от упрощений и использовать «медленную», более точную схему. Если задача состоит в исследовании статистических свойств реального многомодового поля, отказ от упрощённой схемы не оправдан, поскольку статистические результаты, получаемые с FWM и HWM близки друг к другу.

При выборе схемы надо иметь в виду, что модель, снабжённая алгоритмами, описывающими физические процессы, ещё долгое время не может рассматриваться как точная модель. Полную схему целесообразно использовать при моделировании индивидуальных процессов с сильной нелинейностью. Если эти процессы можно рассматривать, как адиабатические, можно быть уверенным, что при задании достаточно-го разрешения результаты точны.

Изложенных в статье сведений достаточно для самостоятельного изготовления модели, учитывающей привычки и потребности новых авторов. Наибольшая польза от модели может быть в будущем достигнута с учётом опыта и предложений её потенциальных пользователей. Статья может быть рассмотрена как оповещение, что модель существует и доступна для получения.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024-0028.

Funding

The study was carried out within the framework of the Shirshov Institute of Oceanology state assignment (theme No. FMWE-2024-0028).

Литература

1. Чаликов Д.В. Различные подходы к моделированию морских волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 1. С. 19–32. doi:10.59887/fpg/uldf-m1x7-1bxg
2. Chalikov D. Numerical modeling of sea waves. Springer, (eBook). 2016. 330 p. doi:10.1007/978-3-319-32916-1
3. Chalikov D. A 2D Model for 3D Periodic Deep-Water Waves // Journal of Marine Science. 2022. Vol. 10, Iss. 3. 410. doi:10.3390/jmse10030410
4. Hasselmann K. On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum, Part 1 // Journal of Fluid Mechanics. 1962. Vol. 12. P. 481–500. doi:10.1017/S0022112062000373
5. Фокина К.В. Испытания ускоренной двумерной модели поверхностных потенциальных волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 2. С. 34–43. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(2)-3
6. Miles J.W. On the generation of surface waves by shear flows // Journal of Fluid Mechanics. 1957. Vol. 3, Iss. 2. P. 185–204. doi:10.1017/S0022112057000567
7. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer / Boundary-Layer Meteorology. 2010. Vol. 138, Iss. 1. P. 1–41. doi:10.1007/s10546-010-9543-7
8. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, Iss. 3. P. 99–164. doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099: GCEWTP>2.3.CO;2
9. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Deutsches Hydrographische Zeitschrift. 1973. Vol. 8, N 12. P. 1–95.

References

1. Chalikov D.V. Different Approaches to Numerical Modeling of Sea Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(1):19–32. doi:10.59887/fpg/uldf-m1x7-1bxg
2. Chalikov D. *Numerical modeling of sea waves*. Springer; 2016. 330 p. doi:10.1007/978-3-319-32916-1
3. Chalikov D. A 2D Model for 3D Periodic Deep-Water Waves. *Journal of Marine Science*. 2022;10(3):410. doi:10.3390/jmse10030410
4. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E. On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum, Part 1. *Journal of Fluid Mechanics*. 1962;12:481–500. doi:10.1017/S0022112062000373
5. Fokina K.V. Testing of the Accelerated Two-Dimensional Model of Surface Potential Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(2):34–43. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(2)-3 (in Russian).
6. Miles J.W. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 1957;3(2):185–204. doi:10.1017/S0022112057000567
7. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*. 2010;138(1):1–41. doi:10.1007/s10546-010-9543-7
8. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*. 1963;91(3):99–164. doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099: GCEWTP>2.3.CO;2
9. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsches Hydrographische Zeitschrift*. 1973;8(12):1–95.

Об авторах

ЧАЛИКОВ Дмитрий Викторович, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8698-9558, WoS ResearcherID: AAO-3528-2020, Scopus AuthorID: 57203700718, SPIN-код (РИНЦ): 4192–7324, e-mail: dmitry-chalikov@yandex.ru

ФОКИНА Карина Владимировна, младший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-1826-0452, WoS ResearcherID MCI-7658-2025, Scopus AuthorID: 57225150215, SPIN-код (РИНЦ): 9395-5822, e-mail: fokinakarina@yandex.ru

DOI 10.59887/2073–6673.2025.18(1)-2

УДК 551.466.3

© К. В. Фокина*, 2025

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

*fokinakarina@yandex.ru

ТРЕХМЕРНАЯ ФАЗО-РАЗРЕШАЮЩАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЫ

Статья поступила в редакцию 21.06.2024, после доработки 08.01.2025, принята в печать 18.02.2025

Аннотация

Статья посвящена модификации трёхмерной фазо-разрешающей модели FWM (Full Wave Model) потенциальных волн (изначально сформулированной для моделирования волн в глубоководных условиях) для моделирования волн на конечной глубине, а также оценке области применимости предложенной модели. Проведены численные эксперименты для квазистационарного волнового режима по результатам которых рассчитывается дисперсионное соотношение для волн на конечной глубине, заданных в начальных условиях спектром JONSWAP. Расчёты проводились для двух вариантов разрешения: однонаправленные и разнонаправленные волны, а также для различных безразмерных значений глубины. На основе рассчитанных статистических характеристик показано совпадение теоретических и модельных расчётов дисперсионного соотношения с удовлетворительной точностью, что позволяет сделать вывод о корректности работы модели в условиях конечности глубины для рассматриваемого случая квазистационарного режима. Предложенная модификация модели применима для моделирования динамики многомодового волнового поля для глубины не меньше, чем 0,1 длины волны пика спектра, что значительно расширяет область применения модели FWM.

Ключевые слова: ветровые волны, фазо-разрешающее моделирование, конечная глубина, фазовая скорость, дисперсионное соотношение, трёхмерное моделирование волн

© К. В. Фокина*, 2025

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

*fokinakarina@yandex.ru

THREE-DIMENSIONAL PHASE-RESOLVING SURFACE WAVE MODEL FOR FINITE DEPTH

Received 21.06.2024, Revised 08.01.2025, Accepted 18.02.2025

Abstract

The paper presents modification of the three-dimensional phase-resolving FWM (Full Wave Model) model of potential waves to simulate the evolution of waves on finite depth water and to determine the range of applicability of the proposed model. Calculations have been carried out to illustrate the fulfillment of the dispersion relation for waves in finite depth, initially assigned by JONSWAP spectrum. The quasi-stationary regime is considered. Calculations were carried out for two resolution options (almost one-dimensional and multidirectional waves) and for various dimensionless depth values. The agreement between theoretical and model calculations of the dispersion relation is shown with a sufficient accuracy on the base of calculated statistic characteristics. The proposed modification of the model is applicable for simulating the multimode wave field for a depth of no less than 0.1 of the maximum wavelength, which significantly expands the field of its application.

Keywords: wind waves, phase-resolving modeling, finite depth, phase velocity, dispersion relation, three-dimensional wave modeling

1. Введение

Изучение развития поверхностных волн под действием ветра при различных условиях является классическим предметом исследований в гидродинамике. В большинстве работ, посвящённых моделированию ветровых волн, рассматриваются глубоководные условия. И хотя подобные исследования позволяют

получить ценную информацию о сложной физике волновых процессов, изучение волн на конечной глубине является значимым и перспективным направлением, особенно если учесть, что именно в относительно небольших мелководных прибрежных районах сосредоточена основная часть человеческой деятельности.

Мелководные районы фактически представляют собой другую физическую среду, где волны напрямую взаимодействуют со дном различными способами и теряют свою энергию и импульс за счёт обрушения более интенсивно, чем волны на глубокой воде. Спектр ветрового волнения и его эволюция на конечной глубине имеют ряд специфических особенностей [1–3].

Систематические попытки понять и описать физику генерации поверхностных волн на конечной глубине были сделаны в различных экспериментальных [4–7], а также в аналитических исследованиях, включая классические работы Захарова [8, 9], и работы Монтальво [10, 11], где были предприняты попытки создания физико-математических моделей, позволяющих понять прибрежные процессы генерации ветрового волнения.

Большое внимание сегодня уделяется изучению волн на конечной глубине с помощью математических моделей [12–16]. В частности модели, основанные на уравнениях Буссинеска [17], которые широко применяются при моделировании прибрежных волн и течений для сложных батиметрических конфигураций [18–20]. Существуют также так называемые Mild Slope Equation (MSE) модели [21], описывающие волны, которые распространяются в водоёмах разной глубины и трансформируются, взаимодействуя с препятствиями, например, со скалами, дамбами или волнорезами. Кроме того, существует ряд задач, в которых важную роль играют эффекты взаимодействия ветровых волн и неоднородного профиля дна. Такие эффекты исследовались в работах Рубана на основе модели в конформных координатах для случая искривлённого неподвижного дна [22] и для подвижного дна [23].

В настоящей работе сделан первый шаг в моделировании ветровых волн на конечной глубине на основе трёхмерной фазо-разрешающей модели FWM (Full Wave Model) [24] (ранее модель использовалась только для волн на бесконечно большой глубине).

Фазо-разрешающим моделированием волн называется подход, основанный на прямом моделировании эволюции поверхности и трёхмерного поля потенциала скорости [25]. Этот подход позволяет воспроизводить полную информацию о волновых процессах в трёхмерном пространстве и времени, несравненно более полную, чем подход, используемый в усредненных по фазам (спектральных) эволюционных моделях. Необходимость в использовании фазо-разрешающих моделей возникает в случаях, когда необходимо получить детальную информацию об индивидуальных волнах (например, при моделировании процесса обрушения волн [26]) или же в задачах, где затруднительно или невозможно использование спектральных моделей (например, при моделировании экстремальных волн [27]). Естественно, этот метод оказывается намного более сложным, чем спектральный, что ограничивает его применение для моделирования волновых процессов в реальных условиях. Главная роль фазо-разрешающих моделей состоит в том, что они могут рассматриваться, как лабораторные модели, свободные от недостатков, связанных с ограничением размеров, существованием помех, неточностей и недостатком измерений. Из-за ограниченности размеров чисто лабораторные эксперименты могут воспроизводить только быстрые нелинейные взаимодействия, тогда как продолжительность процессов в математических моделях ограничена только вычислительными ресурсами и, как следствие, временем вычислений. Поэтому математическая модель оказывается идеальным средством изучения и параметризации физических процессов в волнах, таких как турбулентность, преобразование энергии и импульса.

На механизмы роста волн под действием ветра на конечной глубине влияют различные факторы, например, изменения скорости и направления ветра во времени, батиметрия, потеря энергии волн вследствие трения о дно, турбулентность или нелинейные взаимодействия между волнами. Следует отметить, что в задачу данной статьи не входит рассмотрение влияния всех этих факторов. Основной задачей представленной работы на данном этапе является проверка применимости версии модели в условиях конечной глубины. Другая задача заключалась в определении предельного значения глубины, при котором модель может быть использована для моделирования волн в условиях неменяющегося волнового спектра.

2. Описание трёхмерной модели волн FWM для мелководных условий

Как было отмечено ранее, в работе используется трёхмерная модель волн FWM, основанная на полных уравнениях потенциальной динамики идеальной несжимаемой жидкости со свободной поверхностью. Рассматриваются периодические условия по горизонтальным координатам x и y . Условия периодичности упрощают построение модели, поскольку в таком случае возможно использовать преобразование Фурье

для построения численной схемы. Вертикальная ось ориентирована вверх, положение невозмущённой границы $z = 0$ расположено на свободной поверхности. Все обозначения переменных в настоящей статье аналогичны обозначениям, использованным в [24] для сохранения преемственности.

В модели используется нестационарная, следующая поверхности система координат:

$$\xi = x, \quad \vartheta = y, \quad \zeta = z - \eta(\xi, \vartheta, \tau), \quad \tau = t, \quad (1)$$

где функция $\eta(x, y, t) = \eta(\xi, \vartheta, \tau)$ описывает форму поверхности:

$$\eta(\xi, \vartheta, \tau) = \sum_{-M_x < k_x < M_x, -M_y < k_y < M_y} h_{k_x, k_y}(\tau) \Theta_{k_x, k_y}, \quad (2)$$

h_{k_x, k_y} — коэффициенты Фурье для возвышения поверхности, Θ_{k_x, k_y} — базовые функции разложения Фурье, представленные в виде матрицы:

$$\Theta_{k_x, k_y} = \begin{cases} \cos(k_x \xi + k_y \vartheta) & 1 \leq k_x \leq M_x & -M_y \leq k_y < M_y \\ \cos(k_y \xi) & k_x = 0 & 0 \leq k_y \leq M_y \\ \sin(k_y \xi) & k_x = 0 & -M_y \leq k_y \leq -1 \\ \sin(k_x \xi + k_y \vartheta) & -M_x \leq k_x \leq -1 & -M_y \leq k_y < M_y \end{cases} \quad (3)$$

(M_x, M_y — число мод в направлении x и y соответственно).

Трёхмерные уравнения потенциальных волн принимают следующий вид:

$$\eta_\tau = -\eta_\xi \varphi_\xi - \eta_\vartheta \varphi_\vartheta + (1 + \eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2) \Phi_\zeta, \quad (4)$$

$$\varphi_\tau = -\frac{1}{2} (\varphi_\xi^2 + \varphi_\vartheta^2 - (1 + \eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2) \Phi_\zeta^2) - \eta - p_0, \quad (5)$$

$$\Phi_{\xi\xi} + \Phi_{\vartheta\vartheta} + \Phi_{\zeta\zeta} = 2\eta_\xi \Phi_{\xi\zeta} + 2\eta_\vartheta \Phi_{\vartheta\zeta} + (\eta_{\xi\xi} + \eta_{\vartheta\vartheta}) \Phi_\zeta - (\eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2) \Phi_{\zeta\zeta}, \quad (6)$$

где Φ — трёхмерный потенциал скорости, p_0 — внешнее давление, φ — значение потенциала скорости Φ на поверхности $z = 0$.

Уравнения модели и все последующие результаты представлены в безразмерной форме с использованием следующих масштабов: длины L ($2\pi L$ — размерная длина области), времени $L^{1/2} g^{-1/2}$, потенциала скорости $L^{3/2} g^{1/2}$ (g — ускорение свободного падения), давления Lg . В случае, когда число мод в направлениях x и y разное, стоит рассматривать разные масштабы длины в этих направлениях — L и L_y . Поскольку моделируется квадратная область ($0 < \xi < 2\pi$, $0 < \vartheta < 2\pi$), горизонтальные производные по y в уравнениях (4)–(6) умножаются на коэффициент $\gamma = L/L_y$.

Решение системы уравнений (4)–(6) производится с учётом предположения, что потенциал скорости может быть представлен в виде суммы линейной (или аналитической, т. е. имеющей аналитическое решение) $\bar{\Phi}$ ($\bar{\varphi} = \bar{\Phi}(\xi, \vartheta, 0)$) и нелинейной $\tilde{\Phi}$ ($\tilde{\varphi} = \tilde{\Phi}(\xi, \vartheta, 0)$) компонент. Аналитическая компонента $\bar{\Phi}$ описывается уравнением Лапласа:

$$\bar{\Phi}_{\xi\xi} + \bar{\Phi}_{\vartheta\vartheta} + \bar{\Phi}_{\zeta\zeta} = 0 \quad (7)$$

с известным решением:

$$\bar{\Phi}(\xi, \vartheta, \zeta, \tau) = \sum_{k, l} \bar{\varphi}_{k_x, k_y}(\tau) \exp(|k| \zeta) \Theta_{k_x, k_y}, \quad (8)$$

где $\bar{\varphi}_{k_x, k_y}$ — коэффициенты Фурье аналитической компоненты потенциала на поверхности, $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$. Решение удовлетворяет граничным условиям:

$$\begin{aligned} \zeta = 0: \quad \bar{\Phi} &= \bar{\varphi} \\ \zeta \rightarrow -\infty: \quad \bar{\Phi}_\zeta &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (6) принимает вид:

$$\tilde{\Phi}_{\xi\xi} + \tilde{\Phi}_{\vartheta\vartheta} + \tilde{\Phi}_{\zeta\zeta} = 2\eta_\xi \Phi_{\xi\zeta} + 2\eta_\vartheta \Phi_{\vartheta\zeta} + (\eta_{\xi\xi} + \eta_{\vartheta\vartheta}) \Phi_\zeta - (\eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2) \Phi_{\zeta\zeta} \quad (10)$$

и решается при граничных условиях:

$$\begin{aligned} \zeta = 0: \quad \tilde{\Phi} &= 0 \\ \zeta \rightarrow -\infty: \quad \tilde{\Phi}_\zeta &\rightarrow 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Граничные условия (9) и (11) записаны для условий бесконечно большой глубины. В условиях конечной глубины нормальная скорость обращается в ноль на дне, т. е. $\bar{\Phi}_z(\xi, \vartheta, \zeta = -H_w, \tau) = 0$ и $\bar{\Phi}_\zeta(\xi, \vartheta, \zeta = -H_w, \tau) = 0$ (где H_w — безразмерная глубина области).

Правая часть уравнения (10) содержит полный потенциал скорости $\Phi = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi}$.

Вертикальная производная аналитической компоненты потенциала рассчитывается по формуле:

$$\bar{\Phi}_\zeta = \sum_{k_x, k_y} |k| \bar{\Phi}_{k_x, k_y} \Theta_{k_x, k_y}. \quad (12)$$

В используемой версии модели используется простейшая система координат (1), поэтому нижнее граничное условие для потенциала скорости должно ставиться на глубине $H_w - \eta(\xi, \vartheta, \tau)$. Однако в численной модели нижнее граничное условие задаётся на фиксированной в координате ζ конечной глубине H_w , поэтому искривлённость нижней границы области не учитывается. Зависимость глубины от горизонтальных координат не учитывается. Таким образом, надо иметь в виду, что модель, сформулированная в координатах (1), применима для процессов, в которых возмущения поверхности малы по сравнению с глубиной, т. е. для условия:

$$\max(|\eta|) \ll H_w, \quad (13)$$

где глубина H_w достаточно велика для того, чтобы считать, что волновые возмущения на этой глубине очень малы, и пренебрежение ими не влияет на результаты. Заметим, что аналитически не составляет труда ввести более сложную замену вертикальной координаты, типа $\zeta = z - \eta f(\bar{\zeta})$, где $\bar{\zeta} = \zeta / H_w$, а функция $f(\bar{\zeta})$ равна 1 на поверхности $\bar{\zeta} = 0$ и равна 0 на $\bar{\zeta} = 1$. Однако на практике это приводит к усложнению уравнений и, как следствие, к значительному замедлению вычислений, поэтому в настоящее время эта замена переменных не используется. Замена переменных, указанная выше, позволяет более универсальную формулировку, допускающую исследования волн на произвольно малой глубине вплоть до глубины порядка высоты волны на невозмущённой поверхности.

При несоблюдении условия (13) решение становится неверным и даже возникает вычислительная неустойчивость (выражающаяся в расхождении итераций при решении уравнения (10)) поскольку для расчёта линейной компоненты вертикальной скорости $\bar{w}$ используется формула (12), верная только для глубины $\zeta \gg L_p$ (где $L_p = 2\pi / k_p$ — безразмерная длина волны пика спектра).

3. Формулировка модели FWM для условий конечной глубины

Расширение применимости модели на случай конечной глубины основано на замене в граничных условиях формулы для линейной компоненты потенциала скорости для бесконечной глубины (8) на формулу для конечной глубины

$$\bar{\Phi}(\xi, \vartheta, \zeta, \tau) = \sum_{k_x, k_y} \bar{\Phi}_{k_x, k_y}(\tau) \frac{\cosh(|k|(\zeta + H_w))}{\cosh(|k|H_w)} \Theta_{k_x, k_y}. \quad (14)$$

Формула (14) далее используется для вычисления правой части уравнения (10) и для задания верхнего граничного условия для линейной компоненты вертикальной скорости (12) на конечной глубине:

$$\bar{\Phi}_\zeta(\xi, \vartheta, \zeta) = |k| \Phi_{k_x, k_y} \tanh(|k|H_w) \Theta_{k_x, k_y}. \quad (15)$$

Формула (15) также используется далее при расчёте правой части уравнения (10). Уменьшение глубины области практически не влияет на вертикальный профиль нелинейной компоненты потенциала, так как она уменьшается с глубиной быстрее, чем линейная и её значения меньше на 1–2 порядка. Исходя из этого, в работе сделано предположение, что для применения модели в условиях конечной глубины достаточно внести изменения только в описание линейной компоненты потенциала скорости и, соответственно, нелинейной компоненты вертикальной скорости.

Производные линейной составляющей в (7) рассчитываются аналитически. Используется преобразование Фурье для горизонтальных производных, вертикальные производные вычисляются с помощью конечно-разностной схемы второго порядка точности на неравномерной сетке, заданной соотношением $\Delta\zeta_{j+1} = \chi \Delta\zeta_j$ ($\Delta\zeta$ — вертикальный шаг, χ — коэффициент растяжения, который в расчетах по модели принимается равным 1,2). Неравномерная сетка обеспечивает повышение точности вблизи поверхности для улучшения аппроксимации экспоненциально затухающих мод.

Уравнение (10) для нелинейной компоненты потенциала скорости $\tilde{\Phi}$ решается в пространстве Фурье с помощью трехдиагонального матричного алгоритма (прогонки) [28]. Алгоритм обобщён на трёхмерный

случай на основе Фурье-представления по продольным координатам ξ и η . Правая часть уравнения (10) решается итерациями с последовательной коррекцией правой части. Начальное значение $\tilde{\Phi}$ равно нулю, в процессе вычислений это значение заменяется на значение с предыдущего шага по времени. Итерации продолжаются до тех пор, пока остаточная ошибка для уравнения (10) не будет меньше максимальной невязки $\varepsilon \sim (10^{-4} - 10^{-6}) \|\eta\|$ (где $\|\eta\|$ — норма, принятая равной по порядку величины дисперсии возмущения поверхности). Детали численной схемы и результаты всесторонней проверки модели можно найти в [34]. Уравнения (4)–(6) интегрируются по времени по схеме Рунге-Кутты четвёртого порядка, уравнение (10) решается на каждом промежуточном шаге схемы.

Модель FWM включает в себя алгоритмы, описывающие такие физические процессы как приток энергии, диссипацию за счёт обрушения и диссипацию хвостовой части спектра. Приток энергии рассчитывается на основе теории Майлза [29], согласно которой Фурье-компоненты поверхностного давления связаны с Фурье-компонентами возвышения поверхности через так называемую β -функцию, описание формы которой можно найти в [30]. Нелинейный поток энергии, направленный в область высоких волновых чисел, формирует форму спектрального хвоста, что может привести к накоплению энергии вблизи предельного волнового числа. Рост амплитуд при высоких волновых числах сопровождается ростом локальной крутизны и численной неустойчивостью, поэтому в модель также включён алгоритм диссипации хвостовой части спектра, основанный на использовании высокоселективного фильтра, моделирующего нелинейную вязкость. Основной процесс диссипации (обрушение волны) описывается с помощью схемы, которая основана на операторе диффузии со специальным коэффициентом диффузии, который в свою очередь зависит от локальной криволинейности поверхности. В настоящей работе схема для расчета диссипации за счет обрушения не используется. Детали всех упомянутых схем параметризации подробно описаны в [24].

4. Параметры расчётов

Модель в новых условиях запускалась для девяти различных значений глубины. Значение глубины в каждом эксперименте принималось постоянным и рассчитывалось по формуле:

$$H_w = \frac{L_p}{m}, \quad (16)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots 9$.

Интегрирование по времени проводилось по схеме Рунге-Кутты четвёртого порядка с шагом по времени 0,01 до конечного времени $T = 10000$. Для явной схемы интегрирования по времени критерий устойчивости имеет вид $\Delta t \leq C \omega_{\max}^{-1}$, где Δt — шаг по времени; $\omega_{\max}$ — максимальная частота волн; C — константа, зависящая от схемы (для схемы Рунге-Кутты $C = 2\sqrt{2}$). В [24] отмечено, что такая оценка не всегда работает в модели FWM из-за сильных нелинейных эффектов, поэтому выбор шага по времени осуществляется эмпирически, исходя из соображений устойчивости численной схемы и точности сохранения энергии.

Начальные условия задавались спектром JONSWAP [31] при $U/c_p = 1$ (U — скорость ветра, c_p — фазовая скорость в пике спектра) с максимумом на безразмерном волновом числе $k_p = 13$. Несмотря на то, что спектр JONSWAP был получен для глубоководных условий, он используется и в экспериментах для конечной глубины с целью задания реалистичного волнового спектра в начальных условиях. Рассматривается случай так называемого квазистационарного режима, поэтому диссипация за счет обрушения волн отсутствовала, а очень малый приток энергии полностью компенсировался высокочастотной диссипацией.

Модель FWM интегрировалась при двух вариантах разрешения: 1) $M_x = 256$ и $M_y = 2$; 2) $M_x = 256$ и $M_y = 32$ мод в направлении x и y , что соответствует $N_x \times N_y = (1024 \times 8)$ и $N_x \times N_y = (1024 \times 128)$ узлов сетки в физическом пространстве горизонтальных координат. Такие значения являются оптимальными для заданного спектра JONSWAP, чтобы обеспечить расчёт частоты, затратив при этом минимально возможное время на вычисления. Вертикальные производные аппроксимировались на растянутой сетке $\Delta \zeta_{j+1} = \chi \Delta \zeta_j$, где $\chi = 1, 2$ и $L_w = 30, j = 1, 2, 3 \dots, L_w$.

5. Обсуждение результатов

Результаты рассчитанных по теоретическим формулам дисперсионных соотношений для глубоководных условий ($\omega^2 = |k|$, где ω и k — частота и волновое число соответственно) и для волн на произвольной глубине ($\omega^2 = |k| \tanh(|k| H_w)$) представлены в виде пунктирной и сплошной кривых на рис. 1 разрешения 256×2 и на рис. 2 для разрешения 256×32 . Каждая панель соответствует определённому значению глубины

H_w . Как следует из рисунка, по мере уменьшения глубины отклонение дисперсионного соотношения для волн на глубокой воде от дисперсионного соотношения, полученного для условий конечной глубины, становится более отчётливым, главным образом в низкочастотной части спектра.

Наибольший интерес представляет сравнение значений частоты, рассчитанных по теоретической формуле для конечной глубины и по результатам численных экспериментов. По близости таких значений можно судить о корректности работы модели в условиях конечной глубины.

В процессе работы модели рассчитываются коэффициенты Фурье для поля возвышений η_{k_x, k_y} , которое описывает волны, каждая из которых движется со своей фазовой скоростью и, соответственно, со своей частотой. Возникает задача рассчитать поле частот по имеющимся коэффициентам Фурье для возвышения поверхности.

Дифференцируя поле возвышения, представленного рядом Фурье, по времени, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} &= \sum_{-M_x < k_x < M_x} \sum_{-M_y < k_y < M_y} \frac{\partial \eta_{k_x, k_y}}{\partial \tau} \Theta_{k_x, k_y} + \eta_{k_x, k_y} \frac{\partial \Theta_{k_x, k_y}}{\partial \tau} = \\ &= \sum_{-M_x < k_x < M_x} \sum_{-M_y < k_y < M_y} \frac{\partial \eta_{k_x, k_y}}{\partial \tau} \Theta_{k_x, k_y} + \omega_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y}. \end{aligned} \quad (17)$$

Скорость изменения поверхности за счёт эволюции амплитуд (первое слагаемое) во много раз меньше, чем скорость изменения за счёт продвижения мод $\frac{\partial \eta_{k_x, k_y}}{\partial \tau} \Theta_{k_x, k_y} \ll \omega_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y}$, поэтому скорость эволюции индивидуальной амплитуды описывается соотношением:

$$\frac{\partial \eta_{k_x, k_y}}{\partial \tau} \equiv \dot{\eta}_{k_x, k_y} = \omega_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y}. \quad (18)$$

Расчёт частоты по формуле (18), сопряжён с ошибками, т. к. числитель и знаменатель флуктуируют, и знаменатель может быть очень мал, поэтому стоит использовать ансамбль полей $\dot{\eta}_{k_x, k_y}$ и η_{k_x, k_y} , и применять метод наименьших квадратов, неоднократно использованный в сходных расчётах (см. [24]).

Пусть имеется набор N пар полей, полученных в процессе счёта. Применяя метод наименьших квадратов, т. е. минимизируя сумму S , получаем:

$$S = \sum_{n=1}^N \left(\dot{\eta}_{k_x, k_y} - \omega_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y} \right)^2, \quad (19)$$

с учётом условия $\frac{\partial S}{\partial \omega_{k_x, k_y}} = 0$, получаем:

$$-\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \eta_{-k_x, -k_y} \left(\dot{\eta}_{k_x, k_y} - \omega_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y} \right) = 0, \quad (20)$$

$$\bar{\omega}_{k_x, k_y} = \frac{\sum \eta_{-k_x, -k_y} \dot{\eta}_{k_x, k_y}}{\sum \left(\eta_{-k_x, -k_y} \right)^2}, \quad (21)$$

здесь $\bar{\omega}_{k_x, k_y}$ — средняя частота, вычисленная по всему ансамблю.

Соотношение (21) учитывает только амплитуды при отрицательных значениях индексов. В более общем подходе удобней всего использовать выкладки в терминах комплексных чисел, когда комплексное возвышение η представляется как комплексная переменная

$$\eta = \eta_{k_x, k_y} + i \eta_{-k_x, -k_y}. \quad (22)$$

Тогда вместо квадратичной формы в (21) будет входить произведение комплексно сопряжённых величин. В результате нужно минимизировать сумму:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{n=1}^N \left[\left(\dot{\eta}_{k_x, k_y} - \bar{\omega}_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y} \right) - i \left(\dot{\eta}_{-k_x, -k_y} - \bar{\omega}_{k_x, k_y} \dot{\eta}_{-k_x, -k_y} \right) \right] \times \\ &\times \left[\left(\dot{\eta}_{k_x, k_y} - \bar{\omega}_{k_x, k_y} \eta_{k_x, k_y} \right) + i \left(\dot{\eta}_{-k_x, -k_y} - \bar{\omega}_{k_x, k_y} \dot{\eta}_{-k_x, -k_y} \right) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

После дифференцирования по частоте получаем:

$$\sum_{n=1}^N \left(\eta_{k_x, k_y} \dot{\eta}_{k_x, k_y} - \eta_{-k_x, -k_y} \dot{\eta}_{-k_x, -k_y} \right) - \bar{\omega}_{k_x, k_y} \left(\eta_{k_x, k_y}^2 + \eta_{-k_x, -k_y}^2 \right) = 0, \quad (24)$$

откуда следует соотношение для вычисления $\bar{\omega}_{k_x, k_y}$:

$$\bar{\omega}_{k_x, k_y} = \frac{\sum (\eta_{-k_x, -k_y} \dot{\eta}_{k_x, k_y} - \eta_{k_x, k_y} \dot{\eta}_{-k_x, -k_y})}{\sum (\eta_{k_x, k_y}^2 + \eta_{-k_x, -k_y}^2)} \quad (25)$$

Индексы k_x и k_y с положительным знаком относятся к действительной части комплексного представления (т. е. коэффициенты при $\cos$), а с отрицательным относятся к мнимой части (т. е. коэффициенты при $\sin$). Суммирование производится по ансамблю полей возвышения, размер которых составляет $A \times B$, где $A = M_x$, $B = 2M_y + 1$ (т. е. 256×5 и 256×65 для двух вариантов разрешения), записанных в течение всего периода вычислений.

Результаты численных экспериментов показали, что дисперсионное соотношение, полученное для каждого значения глубины, выполняется с удовлетворительной точностью. Это показывает совпадение значений частоты, рассчитанных по модели (показаны цветными точками) с теоретической тонкой кривой I , которая перекрыта точками (рис. 1 и 2). Здесь стоит отметить, что согласно существующему определению,

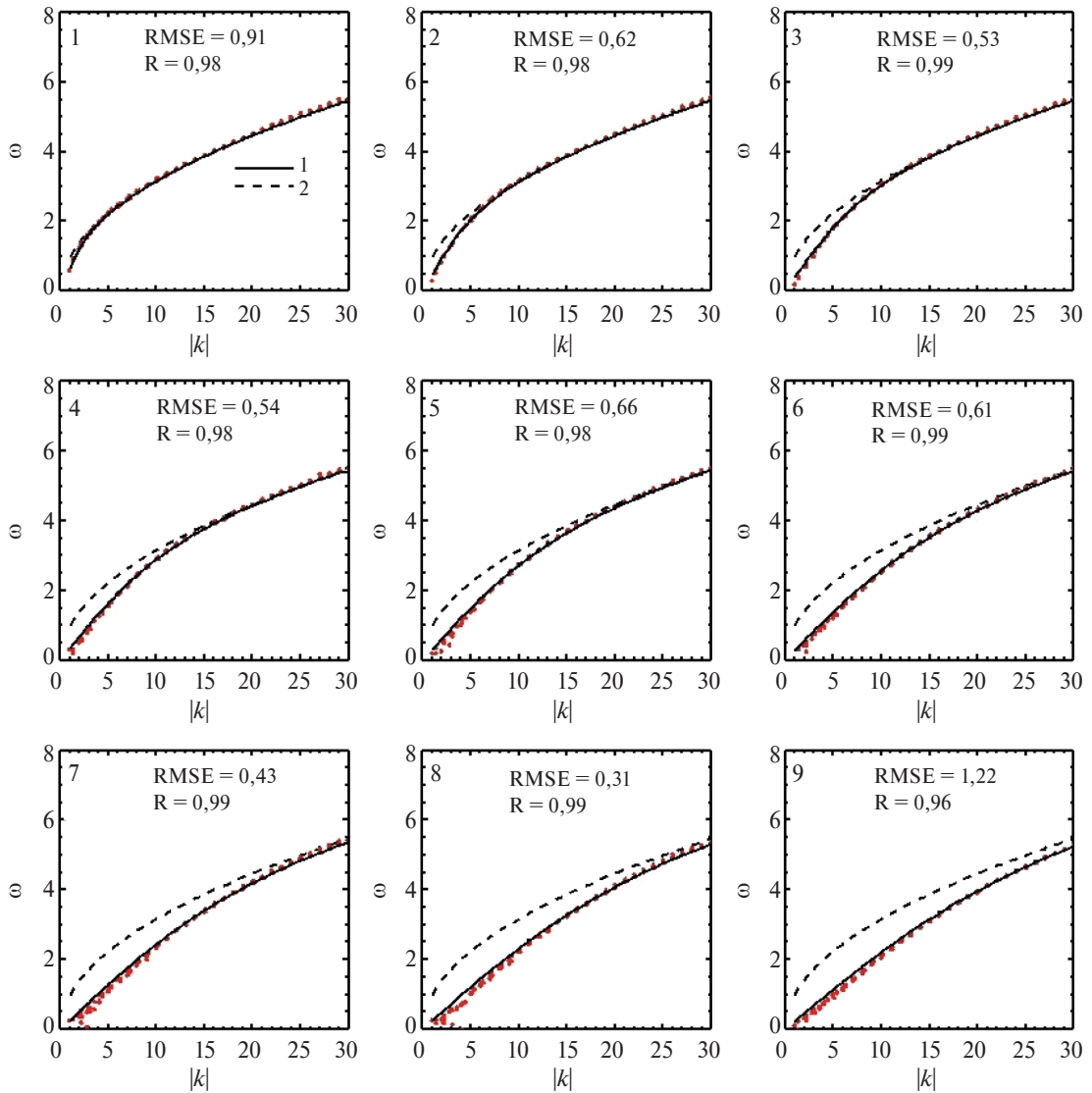


Рис. 1. Зависимость безразмерной частоты ω_{k_x, k_y} (по вертикальной оси) от безразмерного волнового числа $|k|$ (по горизонтальной оси) для разрешения 256×2 : I — частота с учётом глубины, 2 — частота без учёта глубины. Цветные точки — результаты расчётов частоты методом наименьших квадратов

Fig. 1. Dependence of dimensionless frequency ω_{k_x, k_y} as a function of dimensionless wavenumber $|k|$ for resolution 256×2 : I — finite depth, 2 — deep water. Color dots represent the results of frequency calculated using the least-squares method

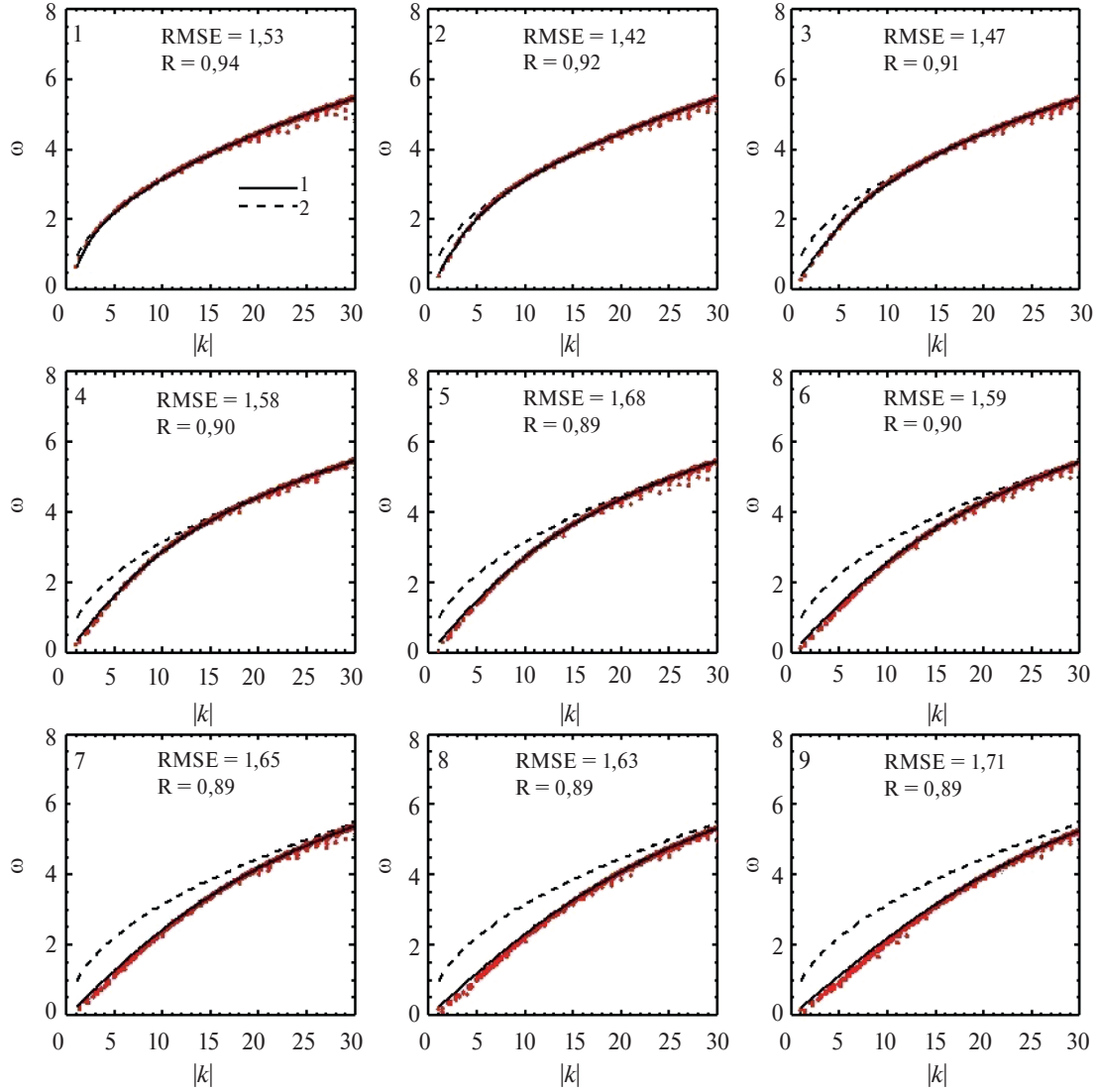


Рис. 2. Зависимость безразмерной частоты ω_{k_x, k_y} (по вертикальной оси) от безразмерного волнового числа $|k|$ (по горизонтальной оси) для разрешения 256×32 : 1 — частота с учётом глубины, 2 — частота без учёта глубины. Цветные точки — результаты расчётов частоты методом наименьших квадратов

Fig. 2. Dependence of dimensionless frequency ω_{k_x, k_y} as a function of dimensionless wavenumber $|k|$ for resolution 256×32 : 1 — finite depth, 2 — deep water. Color dots represent the results of frequency calculated using the least-squares method

глубоководной считается область, где значения глубины $H_w > L/2$ (L — длина волны, за которую в экспериментах принимается длина волны пика спектра L_p), мелководной — область, где значения глубины $H_w < L/20$. Заданные в экспериментах значения глубин относятся к промежуточным, за исключением значений $H_w = L$ (панель 1 на рис. 1 и 2) и $H_w = L/2$ (панель 2 на рис. 1 и 2), которые относятся к глубоководным условиям, что подтверждается совпадением значений частоты, рассчитанных по формулам для глубокой воды и для конечной глубины (пунктирная и сплошная кривые соответственно). Эти случаи были рассмотрены с целью продемонстрировать выполнение в модели FWM дисперсионного соотношения не только для волн в условиях конечной глубины, но и для волн на глубокой воде, что не было показано ранее.

Для оценки точности восстановленного моделью дисперсионного соотношения также были рассчитаны стандартные статистические характеристики:

— среднеквадратическая ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{Mi} - X_{Ti})^2}, \quad (26)$$

– коэффициент корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{Mi} - \bar{X}_M)(X_{Ti} - \bar{X}_T)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Mi} - \bar{X}_M)^2 \sum_{i=1}^N (X_{Ti} - \bar{X}_T)^2}}, \quad (27)$$

где N — количество пар значений ($i = 1, 2, 3 \dots N$), X_{Mi} и X_{Ti} — модельные и теоретические значения в i -й паре соответственно, $\bar{X}_M$ и $\bar{X}_T$ — среднее модельные и теоретические значения соответственно.

Результаты расчётов для двух вариантов разрешений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Статистические параметры сравнения значений частоты для различных значений глубины H_w , рассчитанных по модели FWM и по теоретической формуле

Statistical parameters for comparing the frequency values for different values of depth H_w calculated using FWM model and the theoretical formula

№	$k_p H_w$	Разрешение 256×2		Разрешение 256×32	
		RMSE	R	RMSE	R
1	6,24	0,91	0,98	1,53	0,90
2	3,12	0,62	0,98	1,42	0,89
3	2,08	0,53	0,99	1,47	0,90
4	1,56	0,54	0,98	1,58	0,89
5	1,17	0,66	0,99	1,68	0,89
6	1,04	0,61	0,99	1,59	0,89
7	0,91	0,43	0,99	1,65	0,89
8	0,78	0,31	0,99	1,63	0,89
9	0,65	1,22	0,96	1,71	0,89

Высокие значения коэффициента корреляции и низкое значение среднеквадратической ошибки показывают хорошую согласованность модельных и теоретических расчётов частоты для каждого из значений глубины. Точность сохраняется как при рассмотрении почти одномерных волн (рис. 1), так и волн, распространяющихся в разных направлениях. (рис. 2). По результатам расчётов показано, что полученная версия модели подходит для моделирования волнового поля до глубины, равной $0,1 L_p$.

6. Заключение

Изучение динамики волн на конечной глубине является актуальной задачей, имеющей важное прикладное значение. Разработанная ранее трёхмерная фазо-разрешающая модель потенциальных волн была применима для моделирования волн в глубоководных условиях. В статье рассматривается обобщение модели для условий конечной глубины. Расчёты показали, что замена решения для аналитической компоненты трёхмерного потенциала скорости для глубокой воды на решение, в котором учитывается значение глубины, обеспечивает выполнение дисперсионного соотношения для конечной глубины с удовлетворительной точностью. Показано, что модель способна воспроизводить волновое поле с большим числом мод на относительно небольших глубинах.

Настоящую работу можно считать первым шагом на пути к изучению волн на конечной глубине с помощью фазо-разрешающей модели FWM. На следующих этапах работы предполагается проверка модели в различных условиях, например, для развивающегося ветрового волнения или для волн различной крутизны, и преобразование ускоренной версии модели (AWM) [32] с последующим сравнением полученных результатов.

Благодарности

Автор благодарит проф. Д.В. Чаликова за консультации.

Acknowledgments

The author is grateful to Professor D.V. Chalikov for the assistance.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024-0028.

Funding

The study was carried out within the framework of the Shirshov Institute of Oceanology state assignment (theme No. FMWE-2024-0028).

Литература

1. Young I.R., Babanin A.V. The form of the asymptotic depth-limited wind-wave spectrum: part II — the wavenumber spectrum // *Coastal Engineering*. 2009. Vol. 56, Iss. 5–6. P. 534–542. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.11.005
2. Bouws E., Günther H., Rosenthal W., et al. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form // *Journal of Geophysical Research Oceans*. 1985. Vol. 90, Iss. C1. P. 985–986. doi:10.1029/JC090iC01p00975
3. Bouws E., Günther H., Rosenthal W., et al. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water part 2: Statistical relations between shape and growth stage parameters // *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*. 1987. Vol. 40, Iss. 1. P. 1–24. doi:10.1007/BF02328530
4. Eyhavand A., Peyman B. Experimental study on the growth and conversion of duration- and fetch-limited wind waves in water of finite depth // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 26. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.113020
5. Young I. The growth rate of finite depth wind-generated waves // *Coastal Engineering*. 1997. Vol. 32, Iss. 2. P. 181–195. doi:10.1016/S0378-3839(97)81749-8
6. Young I. *Wind Generated Ocean Waves*. Elsevier Science, 1999. 288 p.
7. Branger H., Manna M., Luneau C., et. al. Growth of surface wind-waves in water of finite depth: A laboratory experiment // *Coastal Engineering*. 2022. Vol. 177. 104174. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.02.008
8. Zakharov V.E. Weakly nonlinear waves on the surface of an ideal finite depth fluid // *American Mathematical Society Transactions*. 1998. Vol. 182, Iss. 2. P. 167–197.
9. Zakharov V. Statistical theory of gravity and capillary waves on the surface of a finite-depth fluid. // *European Journal of Mechanics*. 1999. Vol. 18, Iss. 3. P. 327–344. doi:10.1016/S0997-7546(99)80031-4
10. Montalvo P., Dorignac J., Manna M., et.al. Growth of surface wind-waves in water of finite depth. A theoretical approach // *Coastal Engineering*. 2013. Vol. 77. P. 49–56. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.02.008
11. Montalvo P., Kraenkel R., Manna M., et.al. Wind-wave amplification mechanisms: Possible models for steep wave events in finite depth // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 13, Iss. 11. P. 2805–2813. doi:10.5194/nhess-13-2805-2013
12. Nandi K., Sarka, B., Hossain S., et.al. Wave interaction with multiple thin flexible porous barriers in water of uniform finite depth // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 309. 118475. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.118475
13. Liu S., Waseda T., Zhang X. Four-wave resonant interaction of surface gravity waves in finite water depth // *Physical Review Fluids*. 2022. Vol. 7, Iss. 11. doi:10.1103/PhysRevFluids.7.114803
14. Williams N.J., Peng H. Nonlinear wave modeling over variable depth using extended boussinesq equations // *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2012. P. 643–650.
15. Xu Y., Yu X. Enhanced atmospheric wave boundary layer model for evaluation of wind stress over waters of finite depth // *Progress in Oceanography*. 2021. Vol. 198. 102664. doi:10.1016/j.pocean.2021.102664.
16. Ducrozet G., Gouin M. Influence of varying bathymetry in rogue wave occurrence within unidirectional and directional sea-states // *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2017. Vol. 3, Iss. 6. P. 309–324. doi:10.1007/s40722-017-0086-6
17. Peregrine D.H. Long waves on a beach // *Journal of Fluid Mechanics*. 1967. Vol. 27, Iss. 4. P. 815–827. doi:10.1017/S0022112067002605
18. Gao J., Ma X., Zang Y., et.al. Numerical investigation of harbor oscillations induced by focused transient wave groups // *Coastal Engineering*. 2020. Vol. 158. doi:10.1016/j.coastaleng.2020.103670
19. Gao J., Ma X., Chen H., et. al. On hydrodynamic characteristics of transient harbor resonance excited by double solitary waves // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 219. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.108345
20. Buccino M., Tuozzo S., Ciccaglione M., et.al Predicting crenulate bay profiles from wave fronts: numerical experiments and empirical formulae // *Geosciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 5. 208. doi:10.3390/geosciences11050208
21. Berkhoff J.C. Computation of combined refraction-diffraction // *Proceedings of 13th Conference on Coastal Engineering*. 1972. P. 55–69.

22. Ruban V.P. Water waves over a strongly undulating bottom // *Physical Review E*. 2004. Vol. 70, Iss. 6. 066302. doi:10.1103/PhysRevE.70.066302
23. Ruban V.P. Water waves over a time-dependent bottom: Exact description for 2D potential flows // *Physics Letters A*. 2005. Vol. 340, Iss. 1–4. P. 194–200. doi:10.1016/j.physleta.2005.03.07
24. Chalikov D. Numerical modeling of sea waves. Springer, 2016. 330 p. doi:10.1007/978-3-319-32916-1
25. Чаликов Д.В. Различные подходы к моделированию морских волн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 19–32. doi:10.59887/fpg/u1df-m1x7-1bxx
26. Babanin A.V., Chalikov D., Young I.R., et al. Numerical and laboratory investigation of breaking of steep two-dimensional waves in deep water // *Journal of Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 644. P. 433–463. doi:10.1017/S002211200999245X
27. Слюняев А.В., Кокорина А.В. Численное моделирование «волн-убийц» на морской поверхности в рамках потенциальных уравнений Эйлера // *Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 2. С. 210–223. doi:10.31857/S0002351520020121
28. Thomas L.H. Elliptic problems in linear differential equations over a network // *Watson Scientific Computing Laboratory Report: Columbia University (New York)*, 1949.
29. Miles J.W. On the generation of surface waves by shear flows. // *Journal of Fluid Mechanics*. 1957. Vol. 3, Iss. 2. P. 185–204. doi:10.1017/S0022112057000567
30. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. Vol. 138. P. 1–41. doi:10.1007/s10546-010-9543-7
31. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., et al. Measurements of wind-wave growth and decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*. 1973. Vol. A8, Iss. 12. P. 1–95.
32. Chalikov D. Accelerated reproduction of 2-D periodic waves // *Ocean Dynamics*. 2021. Vol. 71, Iss. 4. P. 309322. doi:10.1007/s10236-021-01450-3

References

1. Young I.R., Babanin A.V. The form of the asymptotic depth-limited wind-wave spectrum: part II — the wavenumber spectrum. *Coastal Engineering*. 2009;56(5–6):534–542. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.11.005
2. Bouws E., Günther H., Rosenthal W., et al. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form. *Journal of Geophysical Research Oceans*. 1985;90(C1):985–986. doi:10.1029/JC090iC01p00975
3. Bouws E., Günther H., Rosenthal W., et al. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water part 2: Statistical relations between shape and growth stage parameters. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*. 1987;40(1):1–24. doi:10.1007/BF02328530
4. Eyhavand A., Peyman B. Experimental study on the growth and conversion of duration- and fetch-limited wind waves in water of finite depth. *Ocean Engineering*. 2022;26. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.113020
5. Young I. The growth rate of finite depth wind-generated waves. *Coastal Engineering*. 1997;32(2):181–195. doi:10.1016/S0378-3839(97)81749-8
6. Young I. Wind Generated Ocean Waves. Elsevier Science; 1999. 288 p.
7. Branger H., Manna M., Luneau C., et. al. Growth of surface wind-waves in water of finite depth: A laboratory experiment. *Coastal Engineering*. 2022;177:104174. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.02.008
8. Zakharov V.E. Weakly nonlinear waves on the surface of an ideal finite depth fluid. *American Mathematical Society Transactions*. 1998;182(2):167–197.
9. Zakharov V. Statistical theory of gravity and capillary waves on the surface of a finite-depth fluid. *European Journal of Mechanics*. 1999;18(3):327–344. doi:10.1016/S0997-7546(99)80031-4
10. Montalvo P., Dornigac J., Manna M., et.al. Growth of surface wind-waves in water of finite depth. A theoretical approach. *Coastal Engineering*. 2013;77:49–56. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.02.008
11. Montalvo P., Kraenkel R., Manna M., et.al. Wind-wave amplification mechanisms: Possible models for steep wave events in finite depth. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013;13(11):2805–2813. doi:10.5194/nhess-13-2805-2013
12. Nandi K., Sarka, B., Hossain S., et.al. Wave interaction with multiple thin flexible porous barriers in water of uniform finite depth. *Ocean Engineering*. 2024;309:118475. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.118475
13. Liu S., Waseda T., Zhang X. Four-wave resonant interaction of surface gravity waves in finite water depth. *Physical Review Fluids*. 2022;7(11). doi:10.1103/PhysRevFluids.7.114803
14. Williams N.J., Peng H. Nonlinear wave modeling over variable depth using extended boussinesq equations. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2012;643–650.
15. Xu Y., Yu X. Enhanced atmospheric wave boundary layer model for evaluation of wind stress over waters of finite depth. *Progress in Oceanography*. 2021;198:102664. doi:10.1016/j.pocean.2021.102664

16. Ducrozet G., Gouin M. Influence of varying bathymetry in rogue wave occurrence within unidirectional and directional sea-states. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2017;3(6):309–324. doi:10.1007/s40722-017-0086-6
17. Peregrine D.H. Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*. 1967;27(4):815–827. doi:10.1017/S0022112067002605
18. Gao J., Ma X., Zang Y., et al. Numerical investigation of harbor oscillations induced by focused transient wave groups. *Coastal Engineering*. 2020;158. doi:10.1016/j.coastaleng.2020.103670
19. Gao J., Ma X., Chen H., et al. On hydrodynamic characteristics of transient harbor resonance excited by double solitary waves. *Ocean Engineering*. 2021;219. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.108345
20. Buccino M., Tuozzo S., Ciccaglione M., et al. Predicting crenulate bay profiles from wave fronts: numerical experiments and empirical formulae. *Geosciences*. 2021;11(5):208. doi:10.3390/geosciences11050208
21. Berkhoff J.C. Computation of combined refraction-diffraction. *Proceedings of 13th Conference on Coastal Engineering*. 1972;55–69.
22. Ruban V.P. Water waves over a strongly undulating bottom. *Physical Review E*. 2004;70(6):066302. doi:10.1103/PhysRevE.70.066302
23. Ruban V.P. Water waves over a time-dependent bottom: Exact description for 2D potential flows. *Physics Letters A*. 2005;340(1–4):194–200. doi:10.1016/j.physleta.2005.03.07
24. Chalikov D. Numerical modeling of sea waves. *Springer*. 2016, 330 p. doi:10.1007/978-3-319-32916-1
25. Chalikov D.V. Different approaches to numerical modeling of sea waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(1):19–32. doi:10.59887/fpg/uidf-m1x7-1bxg
26. Babanin A.V., Chalikov D., Young I.R., et al. Numerical and laboratory investigation of breaking of steep two-dimensional waves in deep water. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010;644:433–463. doi:10.1017/S002211200999245X
27. Slunyaev A.V., Kokorina A.V. Numerical simulation of the sea rogue waves within the framework of the potential Euler equations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020;56(2):179–190. doi:10.1134/S0001433820020127
28. Thomas L.H. Elliptic problems in linear differential equations over a network. *Watson Scientific Computing Laboratory Report*: Columbia University (New York); 1949.
29. Miles J.W. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 1957;3(2):185–204. doi:10.1017/S0022112057000567
30. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*. 2011;138(1):1–41. doi:10.1007/s10546-010-9543-7
31. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., et al. Measurements of wind-wave growth and decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*. 1973; A8(12):1–95.
32. Chalikov D. Accelerated reproduction of 2-D periodic waves. *Ocean Dynamics*. 2021;71(4):309322. doi:10.1007/s10236-021-01450-3

Об авторе

ФОКИНА Карина Владимировна, младший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат физико-математических наук, SPIN-код (РИНЦ): 9395–5822, Scopus AuthorID: 57225150215, ORCID: 0000-0003-1826-0452, e-mail: fokinakarina@yandex.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-3

УДК 551.466.38

© И. А. Сергиевская^{1,2*}, С. А. Ермаков^{1,2}, Т. Н. Лазарева¹, 2025

¹Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, 903950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

²Волжский государственный университет водного транспорта, 903950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5.

*i.sergia@ipfran.ru

МОДОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ, ПОКРЫТОЙ УПРУГОЙ ПЛЕНКОЙ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Статья поступила в редакцию 16.10.2024, после доработки 03.02.2025, принята в печать 06.02.2025

Аннотация

Исследование подавления поверхностных волн пленками нефтепродуктов и биогенными пленками в областях катастрофического цветения фитопланктона является актуальной задачей в приложении к проблеме дистанционной диагностики загрязнений на морской поверхности. Особенностью таких пленок по сравнению с хорошо изученным случаем квазимономолекулярных пленок поверхностно-активных веществ является значительная (порядка и более 1 мкм) толщина пленки, последнюю в этом случае описывают как слой вязкой жидкости. В работе в рамках линейной теории исследовано затухание волн на поверхности воды, покрытой слоем другой вязкой жидкости конечной толщины с упругой границей между ними. Численно проанализированы особенности двух разных типов волновых мод, которые в пределе бесконечно тонкой пленки характеризуются как поперечные (гравитационно-капиллярные волны, ГКВ) и продольные (волны Марангони, ВМ). Проанализирована эволюция этих мод с ростом толщины верхнего слоя вплоть до толщин, много больших толщины вязкого подслоя, в пленке. Показано, что в некотором интервале упругостей границы раздела, определяемым длиной волны и вязкостью жидкостей, при толщине верхнего слоя порядка толщины вязкого подслоя в пленке, происходит взаимная трансформация мод. Именно волна, которая была ГКВ для бесконечно тонкой пленки, при толщинах пленки, превышающих толщину вязкого подслоя, переходит в ВМ, и наоборот. Этот эффект возникает из-за того, что ГКВ и ВМ не являются ни чисто гравитационно-капиллярными, ни чисто дилатационными. Лабораторные эксперименты показали хорошее согласие с результатами численного анализа и подтвердили существование эффекта модовой трансформации.

Ключевые слова: гравитационно-капиллярные волны, волны Марангони, двухслойная жидкость, упругая пленка

© I. A. Sergievskaya^{1,2*}, S. A. Ermakov^{1,2}, T. N. Lazareva¹, 2025

¹A. V Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod 903950, Russia

²Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova Str. Nizhny Novgorod 903950, Russia,

*i.sergia@ipfran.ru

MODE TRANSFORMATION OF WAVES ON THE SURFACE OF A LIQUID COVERED BY AN ELASTIC FILM OF FINITE THICKNESS

Received 16.10.2024, Revised 03.02.2025, Accepted 06.02.2025

Abstract

The study of surface wave suppression due to oil product films and biogenic films in areas of catastrophic phytoplankton blooms is an important task in application to the problem of remote diagnostics of pollution on the sea surface. The peculiarity of such films in comparison with the well-studied case of quasi-monomolecular films of surfactants is a significant (on the order of or more than 1 micron) film thickness, the latter in this case is described as a layer of viscous liquid. This paper investigates wave damping on a water surface covered by a layer of another viscous fluid of finite thickness with an elastic boundary between them within the framework of linear theory. The features of two different types of wave modes, which for infinitely thin film are

Ссылка для цитирования: Сергиевская И.А., Ермаков С.А., Лазарева Т.Н. Модовая трансформация волн на поверхности жидкости, покрытой упругой пленкой конечной толщины // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 31–40. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-3

For citation: Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N. Mode Transformation of Waves on the Surface of a Liquid Covered by an Elastic Film of Finite Thickness. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):31–40.

doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-3

characterized as transverse (gravitational-capillary waves, GCW) and longitudinal (Marangoni waves, MW), are numerically analyzed. The evolution of these modes with increasing thickness of the top layer up to thicknesses much larger than the thickness of the viscous sublayer in the film is analyzed. It is shown that in some interval of interface elasticity, determined by the wavelength and viscosity of the top layer, a mutual transformation of the modes occurs at the thickness of the layer of the order of viscous sublayer thickness in the film. Namely, a wave that was GCW for an infinitely thin film, at film thicknesses greater than the thickness of the viscous sublayer, transitions to a MW, and vice versa. This effect arises because the GCW and MW are neither purely gravity-capillary nor purely dilatational. Laboratory experiments showed good agreement with the numerical results and confirmed the existence of the mode transformation effect.

Keywords: gravity-capillary waves, Marangoni waves, two-layer fluid, elastic film

1. Введение

Исследование подавления волн на поверхности воды в присутствии пленок различной природы, включая пленки нефтепродуктов и пленки биогенного происхождения, является актуальной задачей в приложении к проблеме дистанционной диагностики загрязнений на поверхности океана и внутренних водоемов (см., например, [1, 2]). Особенностью пленок нефти по сравнению с мономолекулярными пленками чистых поверхностно-активных веществ, является значительная их толщина, обычно 0.1–10 мкм [3], а в случае сильных разливов — на порядки больше. Отметим, что и пленки биогенной природы, формируемые в областях интенсивного «цветения воды» также могут характеризоваться значительной толщиной (см. [4]). Такие «толстые» пленки следует описывать как слои вязкой жидкости с упругими границами, и затухание волн на поверхности среды должно анализироваться в рамках модели двухслойной жидкости «вода — толстая пленка».

Затухание волн на поверхности жидкости, покрытой мономолекулярной пленкой хорошо изучено, подробно описаны два типа колебаний поверхности: гравитационно-капиллярные волны (ГКВ) и волны Марангони (ВМ). Выражения для дисперсионного соотношения и коэффициента затухания ГКВ найдены в общем случае с использованием линеаризованного уравнения Навье-Стокса с граничными условиями, учитывающими наличие упругой пленки на водной поверхности (см., например, [5–11]). Наблюдаемый в коэффициенте затухания ГКВ максимум соответствует случаю, когда волновые числа при одной и той же частоте ВМ и ГКВ близки. Lucassen в [9] объяснял этот максимум резонансом между ГКВ и ВМ, но при этом заметил, что это не означает взаимодействия этих двух типов волн между собой. В то же время, в целом ряде работ (см. например, [1, 10], а также литературу, цитированную в [14]) утверждается, что ВМ получают энергию от ГКВ, и этот процесс наиболее эффективен, если частоты и волновые числа этих двух мод близки друг к другу, что и приводит к максимуму затухания. В [12–14] подход к исследованию волновых движений был основан на изначальном разделении скорости на вихревую и потенциальную компоненты. Предположение о возможности существования чисто вихревых движений позволило показать, что горизонтальная компонента скорости ВМ много больше вертикальной, т. е. ВМ можно считать квазигоризонтальной, прижатой к поверхности и затухающей на длине порядка длины волны. Было показано, что математически вихревая компонента ГКВ может быть формально описана как «вынужденная» мода Марангони, возбуждаемая потенциальной компонентой. В [15–17] проведено исследование волн на поверхности жидкости, покрытой упругой пленкой с комплексными упругостью (ненулевой сдвиговой вязкостью) и коэффициентом поверхностного натяжения, и показано, что в этом случае возможна взаимная трансформация мод ВМ и ГКВ. При этом сами авторы отмечали, что хотя физический смысл комплексности этих характеристик до конца не ясен, не учитывать возможную связь между ВМ и ГКВ нельзя.

Случай, когда толщина пленки на поверхности воды конечна, представляет более сложную задачу. В [18] рассматривалась система, состоящая из двух вязких слоев разных жидкостей с упругими пленками на верхней и нижней границах верхнего слоя. Волнение описывается линеаризованным уравнением Навье-Стокса с граничными условиями, учитывающими упругость границ. Предполагается, что такая система должна описывать, например, нефтяную пленку на водной поверхности. Реальная пленка на верхней границе нефтяного слоя может образовываться в связи с тем, что нефть — это сложное вещество, состоящее из разных фракций, которые и образуют пленки. В рамках этой модели в общем случае было найдено решение для ГКВ при толщине пленки много меньше толщины вязкого погранслоя [18]. На основе разделения волн на вихревую и потенциальную компоненту найдены аналитические выражения для дисперсионного уравнения и коэффициента затухания ГКВ для тонкой пленки и для толстого верхнего слоя [19]. В последнем случае, если упругая пленка присутствует на обеих границах верхнего слоя, показано существование двух мод ВМ, прижатых к нижней и верхней границам, и соответственно двух максимумов коэффициента затухания.

Нахождение аналитического решения для случая промежуточных толщин пленок не представляется возможным. В данной статье проводится численное исследование затухания волн длиной 2 см на поверхности двухслойной жидкости. Выбор длины волны определяется тем, что для дистанционной диагностики ветрового волнения часто используются микроволновые радиолокаторы, брэгговские волновые числа которых при умеренных углах падения (например, при использовании радаров, установленных на спутниках) составляют несколько см. В работе проведен численный анализ, который позволил описать эволюцию двух волновых мод, которые для бесконечно тонкой пленки отвечают ГКВ и ВМ, с ростом толщины верхнего слоя. Показано, что в некотором интервале упругостей пленки, определяемом длиной волны и вязкостью жидкостей, при толщине верхнего слоя порядка толщины вязкого подслоя в пленке, происходит модовая трансформация этих типов мод. Далее представлены результаты лабораторных экспериментов, которые показали хорошее согласие с результатами численного анализа и подтвердили существование эффекта трансформации.

2. Описание модели и методики численных расчетов

Анализ волн на поверхности среды, состоящей из двух слоев разных вязких ньютоновских жидкостей, проводится в двумерном случае (z — вертикальная ось, волна распространяется вдоль горизонтальной оси x), пленка с упругостью E находится на границе раздела жидкостей ($z = 0$). Толщина верхнего слоя жидкости h , для простоты предполагается, что нижний слой имеет бесконечную глубину. W/U и P (соответственно вертикальная/горизонтальная компоненты скорости частиц и давление в каждой точке среды) связаны уравнениями Навье-Стокса и уравнением неразрывности:

$$\begin{aligned} U_t + p_x / \rho &= \nu \nabla^2 U, \\ W_t + p_z / \rho + gz &= \nu \nabla^2 W, \\ U_x + W_z &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ, ν — плотность и кинематическая вязкость среды. Нижние индексы (x, z) определяют производные по соответствующим координатам. Решение системы (1) имеет вид $W_{f,w}(z) \cdot \exp(-i\omega t + ikx)$, где $\text{Re}\omega$ — круговая частота, $\text{Im}\omega$ — затухание волны, k — волновое число, нижние индексы соответствуют верхнему (f) или нижнему (w) слоям. В верхнем слое $W_f(z) \propto c_1 \exp(-kz) + c_2 \exp(kz) + c_3 \exp(-l_f \cdot kz) + c_4 \exp(l_f \cdot kz)$, в нижнем слое $W_w(z) \propto b_1 \exp(-kz) + b_3 \exp(-l_w \cdot kz)$, здесь $l_{f,w} = \sqrt{\frac{\omega}{\nu_{f,w}}} + 1$, $d_{f,w} = \frac{\sqrt{2}}{l_{f,w}}$ — толщина вязкого погранслоя в разных слоях жидкости. Члены, содержащие $\exp(\pm kz)$, соответствуют потенциальной компоненте, а члены с $\exp(\pm l_{f,w} \cdot kz)$ — вихревой, $c_{1,2,3,4}$, $b_{1,2}$ — амплитуды соответствующих гармоник.

Для определения амплитуд используют кинематические и динамические граничные условия. Динамические нормальное и тангенциальное граничные условия имеют вид (см., например, [18]) для верхней границы при $z = h$:

$$\begin{aligned} P_f - gz - 2\nu_f W_{fz} + (\sigma_{af} / \rho_f) Z_{xx} &= 0, \\ \rho_f \nu_f (U_{fz} + W_{fx}) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

и нижней границы при $z = 0$:

$$\begin{aligned} \rho_f (P_f - gz - 2\nu_f W_{fz}) &= \rho_w (P_w - gz - 2\nu_w W_{wz}) + \sigma_{fw} \xi_{-xx}, \\ \rho_f \nu_f (U_{fz} + W_{fx}) + E \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} &= \rho_w \nu_w (U_{wz} + W_{wx}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma_{af, fw}$ — поверхностное натяжение на верхней и нижней границах верхнего слоя, g — ускорение сводно-го падения, Z — отклонение поверхности в вертикальной плоскости, ξ — горизонтальный сдвиг, соответственно $W = \frac{\partial Z}{\partial t}$, $U = \frac{\partial \xi}{\partial t}$.

Эта система описывает все волны, которые могут возбуждаться в двухслойной жидкости. Ниже будем интересоваться только двумя типами колебаний, которые при бесконечно тонкой (мономолекулярной) пленке на верхней поверхности нижней жидкости являются ГКВ и ВМ. Мономолекулярная пленка в данном случае соответствует $h = 0$, дисперсионное уравнение и коэффициент затухания имеют вид (см. также [14]) для ГКВ:

$$(\operatorname{Re} \omega)^2 = gk + (\sigma_{af} + \sigma_{fw})k^3, \quad (4)$$

$$\operatorname{Im} \omega = 2\nu_w k^2 \frac{1 - X + X \cdot Y}{1 - 2X + X^2}, \quad X = \frac{Ek^2}{\rho_w \sqrt{2\nu_w \omega^3}}, \quad Y = \frac{Ek}{4\rho_w \nu_w \omega},$$

для ВМ [14]:

$$k^2 = \frac{i+1}{E} \sqrt{\frac{\rho_w \eta_w \omega^3}{2}}. \quad (5)$$

Если толщина верхнего слоя h больше длины ГKB, то коэффициент затухания и дисперсионное уравнение для ГKB выражаются как

$$\operatorname{Im} \omega = 2\nu_f k^2, \quad (\operatorname{Re} \omega)^2 = gk + \sigma_{af} k^3, \quad (6)$$

ВМ в этом случае прижата к границе между слоями, дисперсионное соотношение и коэффициент затухания для нее определяется из выражения [19]:

$$k^2 = \frac{i+1}{E} \left(\sqrt{\frac{\rho_f \eta_f \omega^3}{2}} + \sqrt{\frac{\rho_w \eta_w \omega^3}{2}} \right). \quad (7)$$

На рис. 1 представлены зависимости частоты ГKB и ВМ от упругости пленки для двух случаев: (а) на поверхности воды находится мономолекулярная пленка; (б) толщина верхнего слоя много больше толщины вязкого погранслоя в пленке. Выбранные значения поверхностного натяжения 30 мН/м и 30 мН/м на верхней и нижней границах верхнего слоя, а также объемная вязкость 0,1 см²/м, являются типичными для сырой нефти (с используемой плотностью 0,85 г/см³) и ее производных [20–24], плотность и вязкость нижнего слоя соответствуют воде. Видно, что существует такой интервал упругостей пленки, при которых частоты ГKB (которые близки при тонкой пленке и толстом слое) меньше частот ВМ на тонкой пленке и больше частот ВМ при толстом верхнем слое. Назовем волну, которая для случая тонкой пленки является ВМ — W2, а ту, что является ГKB — W1. Тогда очевидно, что в указанном интервале упругостей частоты волн W1 и W2 пересекаются при некоторых толщинах верхнего слоя.

При численных расчетах зависимостей коэффициента затухания и частоты волны при заданном волновом числе от толщины пленки мы используем выражения (4) и (5) при $h = 0$ как начальные значения для поиска решения при малом ненулевом значении толщины $\delta h \ll d_{f,w}$. Затем найденное решение при $h = \delta h$ будет использоваться в качестве начального для определения коэффициента затухания и частоты при $h = 2\delta h$, и так далее. Это позволит нам проследить, как меняется решение для W1 и W2 при увеличении толщины верхнего слоя. Для проверки результатов, расчеты проводились также от больших толщин верхнего слоя к меньшим, т.е. в качестве начальных точек использовались выражения (6) и (7).

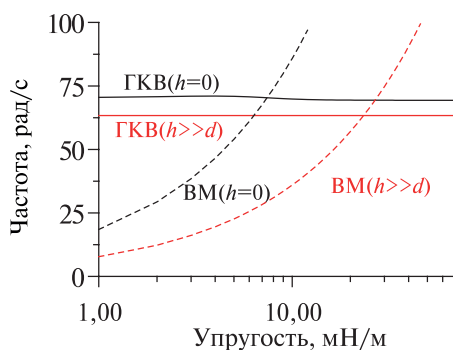


Рис. 1. Зависимость частоты 2 см — волны от упругости пленки, сплошные кривые — ГKB, пунктир — ВМ. Черные кривые — мономолекулярная пленка, пунктир — толстый верхний слой

Fig. 1. Dependence of the 2 cm wave frequency on the film elasticity, solid curves are GCW, dashed curves are MW. Black curves correspond to monomolecular film, dashed — thick top layer

3. Результаты численных расчетов

На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов затухания (нормированные на коэффициент затухания в отсутствие пленки $2\nu_w k^2$) и частот волн W1 и W2 от толщины верхнего слоя при различных упругостях пленки на границы сред. На рис. 2, а и б видно, что если упругость мала ($E < 15$ мН/м) или велика ($E > 25$ мН/м.), то коэффициент затухания и частота волны W1 при тонкой пленке и толстом верхнем слое соответствует ГKB, при некоторых промежуточных толщинах зависимость коэффициента затухания имеет максимум. Однако существует некоторый интервал упругостей ($15 < E < 20$ мН/м), при которых волна W1, являющаяся ГKB при тонкой пленке при больших толщинах соответствует ВМ, т.е. происходит трансформация моды. Волна W2 (рис. 2, в и г) при упругостях $E < 15$ мН/м и $E > 25$ мН/м является ВМ при тонкой пленке

и при толстом верхнем слое; при упругостях $15 < E < 25$ мН/м волна W2 переходит из ВМ в ГKB. Заметим, что интервал упругостей, при котором происходит переход из одного типа колебаний в другое немного меньше интервала упругостей, для которых частоты ГKB меньше частот ВМ на тонкой пленке и больше частот ВМ при толстом верхнем слое (рис. 1). Трансформация колебаний из одного типа в другой происходит скачкообразно в точке бифуркации при определенных значениях упругости и толщины верхнего слоя (порядка толщины погранслоя).

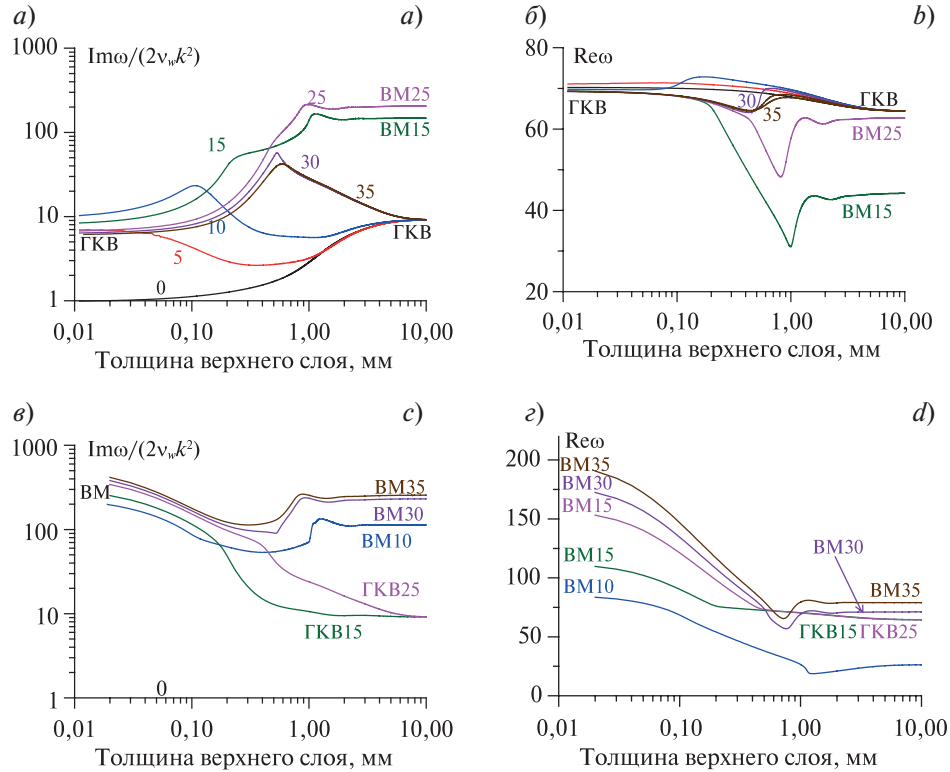


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания (а, в) и частоты (б, г) для волн W1 (а, б) и W2 (в, г) от толщины верхнего слоя. Цифры у кривых — упругости в мН/м, длина волны 2 см

Fig. 2. Dependence of the damping ratio (a, c) and frequency (b, d) on the thickness of the top layer for waves W1 (a, b) and W2 (c, d). The numbers near the curves indicate elasticity in mN/m, wavelength = 2 cm

4. Обсуждение результатов численных расчетов

Проанализируем детально, как происходит трансформация ВМ и ГKB. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента затухания и частоты волн от толщины пленки вблизи точки пересечения коэффициентов затухания W1 и W2. Видно, что частоты волн пересекаются при меньших упругостях и меньших толщинах, чем коэффициенты затухания. Величина локального максимума коэффициента затухания W1 с увеличением упругости возрастает, а величина минимума W2 уменьшается до тех пор, пока они не становятся равными. В нашем случае это соответствует упругости ~ 12 мН/м. При больших величинах упругости поведение W1 и W2 совсем другое: коэффициент затухания W1 растет, а W2 уменьшается (т.е W1 и W2 пересекаются). В этой точке бифуркации меняется и поведение частоты: на W1 появляется максимум, а на W2 — минимум, при больших упругостях кривые не пересекаются. Очевидно, что имеется и вторая точка бифуркации при больших значениях упругости, когда коэффициенты затухания перестают пересекаться, а кривые частот начинают пересекаться. В [15–17] описаны аналогичные точки бифуркации для случая тонкой пленки со сдвиговой вязкостью и комплексной вязкостью.

На рис. 4 представлены профили горизонтальных скоростей волн W1 и W2 для двух упругостей пленок (25 и 60 мН/м). Видно, что при бесконечно малой толщине пленки профиль скорости W1 (рис. 4, а) при обеих упругостях имеет вид, характерный для ГKB, в присутствии пленки горизонтальные скорости

на поверхности имеют направление, противоположное скорости частиц ниже пограничного слоя [14]; профиль скорости W2 (рис. 4, б) характерен для ВМ — волна прижата к поверхности. При большой толщине верхнего слоя (1 см) профиль скорости W1 (рис. 4, в) при упругости 60 мН/м соответствует ГКВ, а при упругости 25 мН/м волна прижата к межфазной границе, что типично для ВМ (см. [19]). В этом случае профиль скорости W2 (рис. 4, г) при упругостях 25 демонстрирует схожесть с ГКВ, а при упругости 60 мН/м — с ВМ. Таким образом, результаты, представленные на рис. 4 соответствуют результатам на рис. 2.

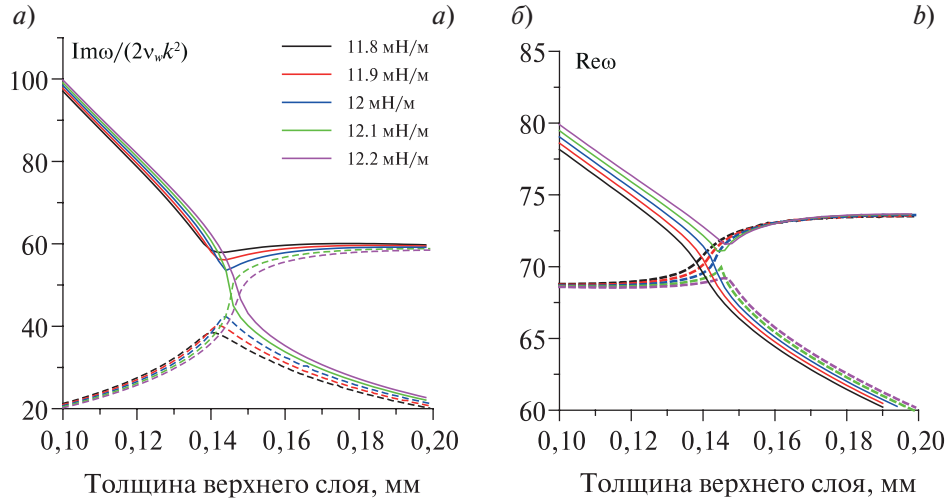


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания (а) и частоты (б) волны от толщины верхнего слоя вблизи точки бифуркации. Длина волны 2 см

Fig. 3. Dependence of the wave damping ratio (a) and frequency (b) on the thickness of the top layer near the bifurcation point. The wavelength is 2 cm

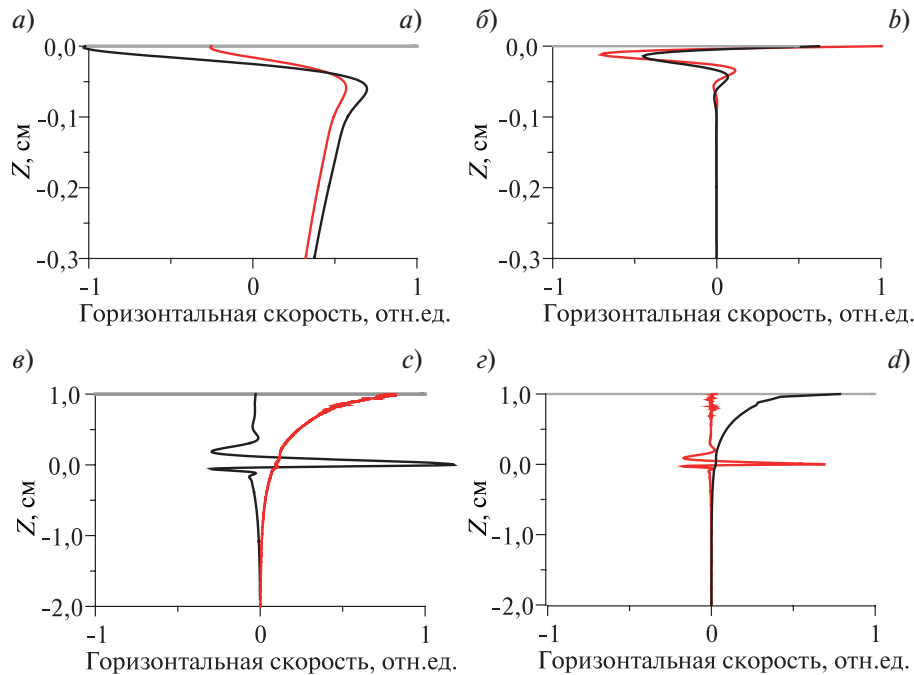


Рис. 4. Профили горизонтальных скоростей волн W1 (а, в) и W2 (б, г) для тонкой пленки (а, б) и толстого слоя (в, г). Черные кривые $E = 25$ мН /м, красные — $E = 60$ мН /м. Серая прямая линия — верхняя граница верхнего слоя

Fig. 4. Horizontal velocity profiles of waves W1 (a, c) and W2 (b, d) for a thin film (a, b) and a thick top layer (c, d). Black curves correspond to $E = 25$ mN/m, red curves to $E = 60$ mN/m. The gray straight line represents the upper boundary of the top layer

5. Лабораторный эксперимент

Были выполнены лабораторные измерения характеристик волн на воде, покрытой слоем вязкой жидкости конечной толщины. Волны возбуждались в кювете с водой, покрытой слоем нефти. Возбуждение волн происходило за счет эффекта параметрического резонанса при вертикальных колебаниях вибростенда, на котором была установлена кювета. Частота параметрически возбуждаемых волн составляла 20 Гц, что на чистой воде соответствовало длине ГКВ около 2 см. Коэффициент затухания волн определялся по порогу возбуждения собственных стоячих мод, а их длина измерялась по фотографиям. Подробно методика параметрического метода описывалась в работе [25], поэтому здесь мы остановимся кратко только на полученных результатах. Измеренные зависимости коэффициента затухания и эффективного коэффициента поверхностного натяжения ($\text{ЭКПН} = (\omega^2 - gk)/k^3$) от толщины нефтяного слоя представлены на рис. 5. Часть данных (черные символы), взятые из [23], были получены при глубине воды 2 см, новые эксперименты (красные символы) проведены при глубине воды 10 см. Видно, что результаты разных экспериментов находятся в хорошем соответствии. На рис. 5 представлены также расчетные кривые для нефти с упругостью на границе нефть/вода 30 мН/м, видно, что результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментом.

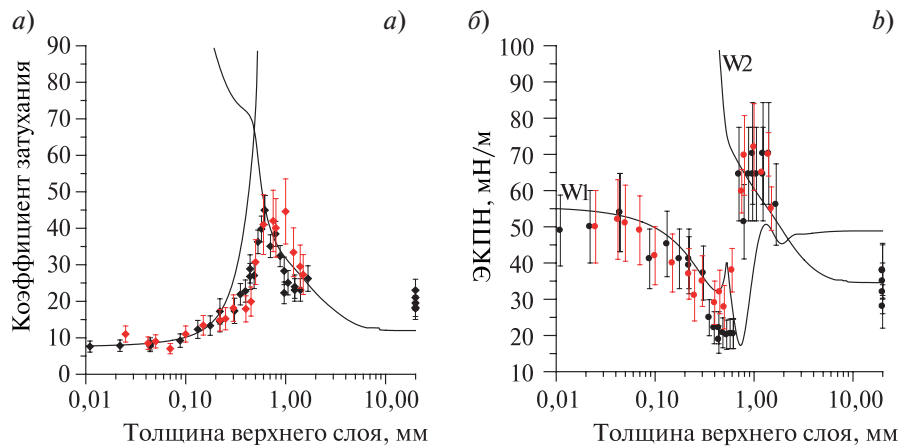


Рис. 5. Коэффициент затухания (а) и ЭКПН (б) от толщины слоя нефти на поверхности воды. Символы — эксперимент, кривые — численные расчеты

Fig. 5. Damping ratio (a) and effective surface tension coefficient (b) as functions of the oil layer thickness on the water surface. Symbols represent experimental data, and curves correspond to numerical calculations

При малых толщинах пленки за счет параметрического резонанса возбуждаются ГКВ (W1), наблюдаемые на поверхности за счет вертикального смещения поверхности воды. При увеличении толщины пленки меняется дисперсионное соотношение для W1 и W2 волн, обе волны содержат и продольные и поперечные компоненты, которые приводят к вертикальному смещению поверхности. Максимум коэффициента затухания в эксперименте приблизительно совпадает с точкой пересечения зависимостей коэффициентов затухания для W1 и W2, а поскольку в эксперименте возбуждаются волны, имеющие наименьшее затухание, то после точки пересечения, первыми возбуждаются волны W2, которым соответствует другая зависимость ЭКПН от толщины, соответственно происходит переход ЭКПН с волны W1 на W2. Поскольку зависимости ЭКПН при данных толщинах не пересекаются, то переход с W1 на W2 происходит скачкообразно, что и подтверждает существование эффекта трансформации мод.

6. Заключение

Проведено численное исследование затухания волн на поверхности жидкости, состоящей из двух вязких слоев конечной толщины и упругой пленки между ними. Продемонстрировано, что два типа колебаний, которые при бесконечно тонком верхнем слое имеют преимущественно поперечный (ГКВ) и продольный характер (ВМ), в общем случае не остаются продольными и поперечными при увеличении толщины верхнего слоя. Показано, что при некоторых значениях упругости пленки мода, которая при бесконечно

тонкой пленке была ГКВ, переходит в ВМ в случае толстого (много больше толщины вязкого погранслоя) верхнего слоя. Одновременно мода, которая при бесконечно тонкой пленке была ВМ, переходит в ГКВ. Это указывает на то, что оба типа колебаний перестают быть чисто гравитационно-капиллярными, либо чисто дилатационными. Данные лабораторных измерений коэффициента затухания и эффективного коэффициента поверхностного натяжения находятся в хорошем согласии с результатами численных расчетов.

Найденные ранее [16, 17] приближенные решения для коэффициента затухания волн справедливы до толщин верхнего слоя порядка толщины вязкого погранслоя, что во многих случаях не соответствует реальной толщине загрязняющей пленки. Численные расчеты, несмотря на сложность их оперативного использования в системах распознавания нефтяных загрязнений на морской поверхности при решении обратных задач, могут быть полезны для оценки точности приближенных формул.

Финансирование

Работа в части численного моделирования ГКВ и ВМ, а также анализ и обсуждения результатов моделирования выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-17-00167), лабораторные эксперименты проведены в рамках госзадания ИПФ РАН FFUF-2024-0033.

Funding

The research in the part of the numerical model and numerical results, as well as discussion was carried out under the financial support of the Russian Science Foundation (Grant № 23-17-00167), laboratory experiments were performed within the framework of the State Assignment of IPF RAS FFUF-2024-0033.

Литература

1. *Alpers W, Huehnerfuss H.* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // *Journal of Geophysical Research*. 1989. Vol. 94(C5). P. 6251–6265. doi.org/10.1029/JC094iC05p06251
2. *Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Da Silva J.C.* et al. Remote sensing of organic films on the water surface using dual co-polarized ship-based X-/C-/S-band radar and terraSAR-X // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. P. 1097. doi:10.3390/rs10071097
3. *Матросова Е.Р., Ходаева В.Н., Иванов А.Ю.* Определение характеристик естественных нефтепроявлений и их подводных источников по данным дистанционного зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 2022. № 2. С. 3–27. doi:10.31857/S0205961422020063
4. *Даниличева О.А., Ермаков С.А.* О проявлениях биогенных плёнок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водоёма // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 5. С. 273–284. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284
5. *Levich V.G.* Physicochemical Hydrodynamics. Englewood New York: Prentice-Hall, Scripta Technica. 1962. 700 p.
6. *Dorrestein R.* General Linearized Theory of The Effect of Surface Films on Water Ripples // *Proceeding of the Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen. Series B. Physical science*. 1951. Vol. 54. P. 260.
7. *Lucassen J., Hansen R.S.* Damping of waves on monolayer-covered surfaces: I. Systems with negligible surface dilational viscosity // *Journal Colloid Interface Science*. 1966. Vol. 22, N 1. P. 32–44. doi:10.1016/0021-9797(66)90064-6
8. *Lucassen J., Van Den Tempe M.* Longitudinal waves on visco-elastic surfaces // *Journal Colloid Interface Science*. 1972. Vol. 41, N 3. P. 491–498. doi:10.1016/0021-9797(72)90373-6
9. *Lucassen J.* Longitudinal capillary waves. Part I. — Theory // *Transactions of the Faraday Society*. 1968. Vol. 64. P. 2221–2229. doi:10.1039/TF9686402221
10. *Cini R., Lombardini P.P., Manfredi C., Cini E.* Ripples damping due to monomolecular films // *Journal Colloid Interface Science*. 1987. Vol. 119, N1. P. 74–80. doi:10.1016/0021-9797(87)90246-3
11. *Cini R., Lombardini P.P., Hüuhnerfuss H.* Remote sensing of marine slicks utilizing their influence on wave spectra // *International Journal of Remote Sensing*. 1983. Vol. 4, N 1. P. 101–110. doi:10.1080/01431168308948533
12. *Dysthe K., Rabin Y.* Damping of short waves by insoluble surface films in ONRL Workshop Proceedings — Role of Surfactant Films on the Interfacial Properties of the Sea Surface, Report No. C-11–86/ edited by F.L. Herr and J. Williams (U.S. Office of Naval Research, London, 1986), P. 187–213.
13. *Dysthe K., Rovner G., Rabin Y.* Damping of capillary waves by polymeric monolayers. Comparison with hydrodynamic theory // *Journal of Physical Chemistry*. 1986. Vol. 90, Iss. 17. P. 3894–3895. doi.org/10.1021/j100408a012
14. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Российская академия наук. Институт прикладной физики — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. 160 с.

15. Earnshaw J.C., McLaughlin A.C. Waves at liquid surfaces: Coupled oscillators and mode mixing // Proceedings of the Royal Society. Serial A. Physical Science. 1991. Vol. 433, N1889. P. 663–678. doi:10.1098/rspa.1991.0069
16. Brown S.J. Gravity, capillary and dilation wave mode resonance at a viscoelastic two-fluid interface // Ph.D. thesis (Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2005.
17. Brown S.J., Triantafyllou M.S., Yue D.K.P. Complex analysis of resonance conditions for coupled capillary and dilational waves // Proceedings of the Royal Society. Serial A. Physical science. 2002. Vol. 458. P. 1167–1187. doi:10.1098/rspa.2001.0892
18. Jenkins A., Jakobs S. Wave damping by a thin layer of viscous fluid // Physics of Fluids. 1997. Vol. 9, N 5. P. 1256–1264. doi:10.1063/1.869240
19. Ermakov S.A., Khazanov G.E. Resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a visco-elastic film of finite thickness: A reappraisal // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34, P. 092107. doi:10.1063/5.0103110
20. Ермаков С.А. Резонансное затухание гравитационно-капиллярных волн на воде, покрытой поверхностно-активной пленкой // Известия АН Физики Атмосферы и Океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 691–696.
21. Ермаков С.А., Сергеевская И.А., Гуцин Л.А. Затухание гравитационно-капиллярных волн в присутствии нефтяных пятен по данным лабораторного и численного эксперимента // Известия Физики Атмосферы и Океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 631–639.
22. Сергеевская И.А., Ермаков С.А. Затухание гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды, покрытой вязкоупругой пленкой конечной толщины // Известия РАН Физики Атмосферы и Океана. 2017. Т. 53, № 6. С. 738–746. doi:10.7868/S0003351517060083
23. Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N., Guo J. Damping of surface waves due to crude oil /oil emulsion film on water // Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 146. P. 206–214. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.06.018
24. Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T. On damping of short gravity-capillary waves due to oil derivatives film on the water surface// Proceeding SPIE — The International Society for Optical Engineering “Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2016. Vol. C. 999903. doi:10.1117/12.2241811
25. Ermakov S.A., Kijashko S.V., Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films, “Marine surface films” / Eds. M. Gade, H. Huehnerfuss, G. Korenovski. Springer, 2006. P. 113–128.

References

1. Alpers W., Huehnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem. *Journal of Geophysical Research*. 1989;94(C5):6251–6265. doi:10.1029/JC094iC05p06251
2. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Da Silva J.C. et al. Remote sensing of organic films on the water surface using dual co-polarized ship-based X-/C-/S-band radar and terraSAR-X. *Remote Sensing*. 2018;10(7):1097. doi:10.3390/rs10071097
3. Matrosova E.R., Khodaeva V.N., Ivanov A. Yu. Determination of characteristics of natural oil sleeps and their under-water sources from remote sensing data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2022;2:3–27 doi:10.31857/S0205961422020063 (in Russian).
4. Danilicheva O.A., Ermakov S.A. On biogenic film manifestations in satellite multispectral images of eutrophic water bodies *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023;20(5):273–284. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284 (in Russian).
5. Levich V.G. *Physicochemical Hydrodynamics*. Englewood New York: Prentice-Hall, Scripta Technica; 1962. 700 p.
6. Dorrestein R. General Linearized Theory of The Effect of Surface Films on Water Ripples. *Proceeding of the Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen. Series B. Physical science*. 1951;54:260.
7. Lucassen J., Hansen R.S. Damping of waves on monolayer-covered surfaces: I. Systems with negligible surface dilatational viscosity. *Journal Colloid Interface Science*. 1966;22(1):32–44. doi:10.1016/0021-9797(66)90064-6
8. Lucassen J., Van Den Tempe M. Longitudinal waves on visco-elastic surfaces. *Journal Colloid Interface Science*. 1972;41(3): 491–498. doi:10.1016/0021-9797(72)90373-6
9. Lucassen J. Longitudinal capillary waves. Part I. — Theory. *Transactions of the Faraday Society*. 1968;64:2221–2229. doi:10.1039/TF9686402221
10. Cini R., Lombardini P.P., Manfredi C., Cini E. Ripples damping due to monomolecular films. *Journal Colloid Interface Science*. 1987;119(1):74–80. doi:10.1016/0021-797(87)90246-3
11. Cini R., Lombardini P.P., Hüehnerfuss H. Remote sensing of marine slicks utilizing their influence on wave spectra. *International Journal of Remote Sensing*. 1983;4(1):101–110. doi:10.1080/01431168308948533
12. Dysthe K., Rabin Y. Damping of short waves by insoluble surface films in ONRL Workshop Proceedings — Role of Surfactant Films on the Interfacial Properties of the Sea Surface, Report No. C-11–86 / Eds. F.L. Herr and J. Williams (U.S. Office of Naval Research, London, 1986). P. 187–213.

13. Dysthe K., Rovner G., Rabin Y. Damping of capillary waves by polymeric monolayers. Comparison with hydrodynamic theory. *Journal of Physical Chemistry*. 1986;90(17):3894–3895. doi:10.1021/j100408a012
14. Ermakov S.A. Influence of films on the dynamics of gravitational-capillary waves. Nizhny Novgorod: IAP RAS; 2010. 160 p. (in Russian).
15. Earnshaw J.C., McLaughlin A.C. Waves at liquid surfaces: Coupled oscillators and mode mixing. *Proceedings of the Royal Society. Serial A. Physical science*. 1991, 433(1889), 663–678. doi:10.1098/rspa.1991.0069
16. Brown S.J. Gravity, capillary and dilation wave mode resonance at a viscoelastic two-fluid interface. Ph.D. thesis (Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2005).
17. Brown S.J., Triantafyllou M.S., Yue D.K.P. Complex analysis of resonance conditions for coupled capillary and dilational waves. *Proceedings of the Royal Society. Serial A. Physical science*. 2002;458:1167–1187. doi:10.1098/rspa.2001.0892
18. Jenkins A., Jakobs S. Wave damping by a thin layer of viscous fluid. *Physics of Fluids*. 1997;9(5):1256–1264. doi:10.1063/1.869240
19. Ermakov S.A., Khazanov G.E. Resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a visco-elastic film of finite thickness: A reappraisal. *Physics of Fluids*. 2022;34(9):092107. doi:10.1063/5.0103110
20. Ermakov S.A. Resonance damping of gravity-capillary waves on the water surface covered with a surface-active film. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2003;39(5):624–628.
21. Ermakov S.A., Sergievskaia I.A., Gushchin L.A. Damping of gravity-capillary waves in the presence of oil slicks according to data from laboratory and numerical experiment. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012;48:565–572. doi:10.1134/S000143381204007X
22. Sergievskaia I.A., Ermakov S.A. Damping of gravity–capillary waves on water surface covered with a visco-elastic film of finite thickness. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017;53:650–658. doi:10.1134/S000143381706010X
23. Sergievskaia I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N., Guo J. Damping of surface waves due to crude oil /oil emulsion film on water. *Marine Pollution Bulletin*. 2019;146:206–214. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.06.018
24. Sergievskaia I., Ermakov S., Lazareva T. On damping of short gravity-capillary waves due to oil derivatives film on the water surface. *Proceeding SPIE9999, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016*, 999903 (19 October 2016). doi:10.1117/12.2241811
25. Ermakov S.A., Kijashko S.V. Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films, “Marine surface films”, ed. M. Gade, H. Huehnerfuss, G. Korenovski, Springer; 2006. P. 113–128.

Об авторах

СЕРГИЕВСКАЯ Ирина Андреевна, заведующий лабораторией ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-8870-2047, Scopus AuthorID: 6602742495, WoS ResearcherID: L-6146-2017, SPIN-код (РИНЦ): 4319-2123, e-mail: i.sergia@ipfran.ru

ЕРМАКОВ Станислав Александрович, заведующий отделом ИПФ РАН, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-0869-4954, Scopus AuthorID: 7006796194, WoS ResearcherID: L-6157-2017, SPIN-код (РИНЦ): 3040-6396, e-mail: stas.ermakov@ipfran.ru

ЛАЗАРЕВА Татьяна Николаевна, ведущий программист ИПФ РАН, ORCID: 0000-0002-0674-4831, Scopus AuthorID: 54884797800, WoS ResearcherID: AAJ-4607-2021, SPIN-код (РИНЦ): 7114-0790, e-mail: lazareva@ipfran.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-4

УДК 551.466.2

© В. В. Баханов*, С. Н. Власов, Е. В. Копосова, 2025

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
*bakh@ipfran.ru

МОДУЛЯЦИОННО-САМОФОКУСИРОВОЧНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ УГЛОВ И ЧАСТОТ

Статья поступила в редакцию 19.11.2024, после доработки 13.12.2024, принята в печать 03.02.2025

Аннотация

Излагается теория неустойчивости гравитационно-капиллярных волн на поверхности жидкости с учетом линейной и нелинейной дисперсий. Теоретическое исследование проводится на основе использования интегродифференциального оператора для описания линейной дисперсии волн. Сначала рассматривается случай кубичной нелинейности без учета дисперсии нелинейности. Найдены инкременты неустойчивости. Проводится сравнение со случаем параболической аппроксимации линейной дисперсионной зависимости, что соответствует использованию нелинейного уравнения Шредингера. Показано, что использование интегродифференциального оператора для описания линейной дисперсии волн приводит к ограничению области неустойчивости, но не меняет величины инкремента. Получено, что дисперсия нелинейности уменьшает инкременты, особенно при больших расстройках. Влияние капиллярных эффектов на неустойчивость волн на поверхности жидкости проводится в той же последовательности: сначала без учета дисперсии нелинейности, затем с ее учетом. Структура неустойчивости меняется для волн, распространяющихся с минимальными фазовыми и групповыми скоростями: при уменьшении длины волны область неустойчивости суживается и потом исчезает. Определены границы исчезновения области неустойчивости. При дальнейшем уменьшении длины волны неустойчивость возникает вновь. Она приобретает черты «коллапса», когда область неустойчивости становится эллиптической. Вид неустойчивости волн с большими волновыми числами имеет «самофокусирующий» характер в отличие от модуляционного характера неустойчивости волн с малыми волновыми числами. Нелинейная дисперсия в гравитационно-капиллярных волнах, как и в гравитационных волнах, ведет к подавлению неустойчивости при больших расстройках. В области существования неустойчивости типа «коллапса» нелинейная дисперсия ведет к сужению области неустойчивости и уменьшению инкремента в них. Это дает возможность описывать на основе предлагаемых уравнений распространения гравитационно-капиллярных волн на больших временах.

Ключевые слова: гравитационные волны, капиллярность, поверхность жидкости, нелинейность, дисперсия, неустойчивость, модуляция

© V. V. Bakhanov*, S. N. Vlasov, E. V. Kopusova, 2025

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia
*bakh@ipfran.ru

MODULATION-SELF-FOCUSING INSTABILITY OF GRAVITY-CAPILLARY WAVES IN A WIDE RANGE OF ANGLES AND FREQUENCIES

Received 19.11.2024, Revised 13.12.2024, Accepted 03.02.2025

Abstract

The theory of instability of gravity-capillary waves on the surface of a liquid taking into account linear and nonlinear dispersions is presented. Theoretical research is carried out on the basis of the use of an integrodifference operator to describe the linear dispersion of waves. Increments of instability are found. It is shown that the use of an integrodifference operator to describe the gravity wave linear dispersion without taking into account their nonlinear dispersion leads to the instability region limitation

Ссылка для цитирования: Баханов В.В., Власов С.Н., Копосова Е.В. Модуляционно-самофокусирующая неустойчивость гравитационно-капиллярных волн в широком интервале углов и частот // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 41–52. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-4

For citation: Bakhanov V.V., Vlasov S.N., Kopusova E.V. Modulation-Self-Focusing Instability of Gravity-Capillary Waves in a Wide Range of Angles and Frequencies. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):41–52. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-4

compared to the case of using the nonlinear Schrödinger equation, but does not change the increment value. The dispersion of the nonlinearity of gravity surface waves reduces increments, especially at large detunes. The structure of instability changes for gravity-capillary waves propagating with minimal phase and group velocities: as the wavelength decreases, the instability region narrows and then disappears. The boundaries of the disappearance of instability area are determined. With a further wavelength decrease, instability occurs again. It acquires the features of “collapse”, when the instability region becomes elliptical. The instability of waves with large wave numbers has a “self-focusing” character, in contrast to the modulation nature of the instability of waves with small wave numbers. Nonlinear dispersion in gravity-capillary waves, as well as in gravity waves, leads to the suppression of instability under large detunes.

Keywords: gravity waves, capillarity, fluid surface, nonlinearity, dispersion, instability, modulation

1. Введение

Модуляционно-самофокусирующая неустойчивость интенсивных волн различной природы: оптических, гидродинамических, волн в плазме, связанная с кубичной нелинейностью, известна с середины 1960-х гг. [1–8]. С первых работ эта неустойчивость рассматривалась для волн возмущений на частотах, близких к несущей и распространяющихся почти коллинеарно с мощной волной, когда существенная часть нелинейных явлений может быть описана нелинейным уравнением Шредингера. Это описание, наряду со своей простотой, имеет ряд недостатков: в волнах на поверхности жидкости оно дает неустойчивость с необычайно высоким инкрементом для сколь угодно высоких частот; для электромагнитных волн и волн в плазме оно предсказывает обращение амплитуды поля в бесконечность — коллапс. Оба последних явления обусловлены недостаточно точным описанием дисперсии в линейной и нелинейной частях системы. Более точная теория на основе использования гамильтонова описания предложена в [9–12]. В [13] рассматривается влияние равномерного сдвигового течения на модуляцию слабонелинейных квазимонохроматических поверхностных гравитационных волн в гамильтоновой формулировке. Однако гамильтоново описание само по себе является достаточно сложным.

В данной работе более подробно излагается упрощенная теория модуляционно-самофокусирующей неустойчивости гравитационно-капиллярных волн в широком интервале углов и частот [14, 15] на основе использования интегродифференциального оператора для описания линейной дисперсии. Краткие результаты ее приводились в [16]. Аналогичный подход использовался в [17] для пакетов гравитационно-капиллярных волн с узким спектром. Она применима и к негамильтоновым системам, но требует знания дисперсионных характеристик одного из типов волн, распространяющихся в среде. Эти характеристики могут быть и результатом обработки опытных данных.

2. Модуляционная неустойчивость гравитационных волн на поверхности жидкости

Пусть известна дисперсионная характеристика одного из типов волн:

$$\omega = F(\mathbf{k}), \quad (1)$$

где ω — круговая частота, $\mathbf{k}$ — волновой вектор. Поле A_0 , существующее в среде с таким дисперсионным соотношением, может быть описано интегральным соотношением [15]:

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} = \frac{i}{(2\pi)^s} \iint F(\mathbf{k}') \exp[-i\mathbf{k}\mathbf{r} + i\mathbf{k}'\mathbf{r}'] A_0(\mathbf{r}') d\mathbf{k}' d\mathbf{r}', \quad (2)$$

где s — размерность пространства. Пусть уравнение (2) имеет решение вида плоской волны с постоянной амплитудой $\bar{A}$:

$$A_0 = \bar{A} \exp(i\omega_0 t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}). \quad (3)$$

Для сокращения записи введем оператор:

$$L(\mathbf{k}_0) \bar{A} = \frac{i}{(2\pi)^s} \iint F(\mathbf{k}_0 + \mathbf{k}') \exp[-i\mathbf{k}\mathbf{r} + i\mathbf{k}'\mathbf{r}'] \bar{A}(\mathbf{r}') d\mathbf{k}' d\mathbf{r}' \quad (4)$$

и запишем уравнение для $\bar{A}$ в виде:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = iL(\mathbf{k}_0) \bar{A} - i\omega_0 \bar{A}. \quad (5)$$

Дополним последнее соотношение нелинейным членом $\sim |\bar{A}|^2 \bar{A}$. Коэффициент перед нелинейным членом выберем исходя из уравнения для плоской волны. Амплитуду мы нормируем так, чтобы коэффициент перед нелинейностью равнялся половине, что более удобно при дальнейших записях. В результате имеем следующее уравнение, описывающее распространение волн в такой среде:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = iL(\mathbf{k}_0) \bar{A} - i\omega_0 \bar{A} + \frac{i\delta\omega_0 |\bar{A}|^2 \bar{A}}{2}, \quad (6)$$

где δ — коэффициент, принимающий два значения: $\delta = \pm 1$. Знак «+» соответствует расфокусирующей нелинейности в оптике, знак «−» соответствует самофокусирующей нелинейности. Запись нелинейности в таком простейшем виде означает, что мы пренебрегли дисперсией нелинейности.

В нелинейном уравнении (6) мы исследуем устойчивость методом возмущений его решений вида плоской волны:

$$\bar{A} = B \exp(i\Omega t), \quad (7)$$

где $\Omega = \delta\omega_0 |B|^2/2$ — суть нелинейная поправка к частоте. Возьмем возмущенное решение в форме:

$$\bar{A} = [B + \alpha] \exp(i\Omega t), \quad (8)$$

где α — малая величина. Предполагая, что α имеет вид:

$$\alpha = \alpha_0(t) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}) + \beta_0(t) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}), \quad (9)$$

для амплитуд возмущений получим пару линейных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d\alpha_0}{dt} = iL(\mathbf{k}_0 + \mathbf{k})\alpha_0 - i\omega_0\alpha_0 + \frac{i\delta\omega_0 |B|^2}{2}\alpha_0 + \frac{i\delta\omega_0 B^2}{2}\beta_0^*, \quad (10)$$

$$\frac{d\beta_0^*}{dt} = -iL(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k})\beta_0^* + i\omega_0\beta_0^* - \frac{i\delta\omega_0 |B|^2}{2}\beta_0^* - \frac{i\delta\omega_0 B^{*2}}{2}\alpha_0. \quad (11)$$

Предполагая, что решения $\alpha_0 \sim \beta_0 \sim \exp[h\omega_0 t]$, для инкремента, нормированного на частоту ω , имеем:

$$\begin{aligned} h &= i \frac{\omega_+ - \omega_-}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\delta^2 |B|^4 - (\omega_+ + \omega_- - 2 + \delta |B|^2)^2} = \\ &= i \frac{\omega_+ - \omega_-}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{-2\delta |B|^2 (2 - \omega_+ - \omega_-) - (\omega_+ + \omega_- - 2)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\omega_+ = F(\mathbf{k}_0 + \mathbf{k})/\omega_0$ — линейная расстройка одной из компонент возмущений, $\omega_- = F(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k})/\omega_0$ — линейная расстройка другой компоненты возмущений. Очевидно, что для изотропных сред вектор $\mathbf{k}_0$ целесообразно направить по одной из координатных осей — по оси x .

Границы неустойчивости определяются условиями:

$$\omega_+ + \omega_- = 2, \quad (13)$$

$$2\delta |B|^2 - 2 + \omega_+ + \omega_- = 0. \quad (14)$$

Первая из них определяется линейной дисперсией. Она описывает действительную поверхность, если дисперсионная зависимость выпукла. В этом случае неустойчивость имеет место как для фокусирующей нелинейности, так и для расфокусирующей нелинейности, области неустойчивости располагаются для разных знаков нелинейности по разные стороны от поверхности (13).

Для потенциальных гравитационных волн на поверхности жидкости:

$$\omega = \sqrt{g|k_0|} = \sqrt{g(k_{0x}^2 + k_{0y}^2)^{1/2}}, \quad (15)$$

где g — ускорение свободного падения, k_{0x} и k_{0y} — компоненты волнового вектора на плоскости. В этом случае уравнение (6) запишется в виде [15, 18]:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = iL(\mathbf{k}_0) \bar{A} - i\omega_0 \bar{A} + \frac{i\omega_0 |\mathbf{k}_0 \bar{A}|^2 \bar{A}}{2}, \quad (16)$$

где $\bar{A}$ — амплитуда волны. При исследовании неустойчивости перейдем к безразмерным переменным

$t_{dl} = \frac{\omega_0 t}{2}$, $x_{dl} = k_0 x$, $y_{dl} = k_0 y$, $z_{dl} = k_0 z$, $A_{dl} = 2k_0 \bar{A}$. Опуская индекс «dl», запишем уравнение (16) в форме:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{2i}{\omega_0} L(\mathbf{k}_0) A - 2iA + \frac{i}{4} |A|^2 A. \quad (17)$$

Для нормированного инкремента волн возмущений на воде имеем:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{|A|^4}{4} - \left\{ 2 \left[(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2 \right]^{1/4} + 2 \left[(1 - \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2 \right]^{1/4} - 4 + \frac{|A|^2}{2} \right\}^2}, \quad (18)$$

где $\tilde{k}_x = k_x/k_0$, $\tilde{k}_y = k_y/k_0$. Заметим, что гравитационные волны на поверхности существуют при $A \leq 0,88718$. Область отличного от нуля инкремента для $A = 0,15$ показана на рис. 1.

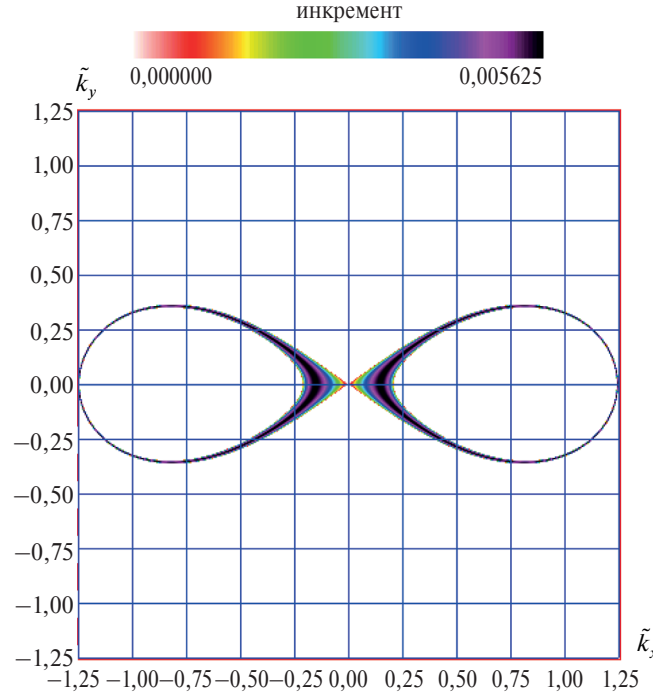


Рис. 1. Области неустойчивости гравитационных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ с учетом полной линейной дисперсии без нелинейной дисперсии для амплитуды волны $A = 0,15$

Fig. 1. Regions of instability of gravity waves on a plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$, taking into account the full linear dispersion without nonlinear dispersion for the wave amplitude $A = 0.15$

На плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ область неустойчивости имеет вид горизонтальной восьмерки, примыкающей к восьмёрке четырехволнового синхронизма. Точки $\tilde{k}_x = \pm 1$, $\tilde{k}_y = 0$, лежащие в середине петель восьмерки, всегда устойчивы. Максимальное (и одно и то же для данной амплитуды) значение инкремента $h_{\max} = A^2/4 = (0,15)^2/4 = 0,005625$ достигается при условии:

$$4 - 2 \left[(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2 \right]^{1/4} + 2 \left[(1 - \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2 \right]^{1/4} = \frac{A^2}{2}. \quad (19)$$

Последнее выполняется также на восьмерке, лежащей вблизи четырехволнового синхронизма. При малых расстройках $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y \ll 1$ волна накачки неустойчива только относительно волн, имеющих отличную от нуля компоненту $\tilde{k}_x$, т. е. имеет место модуляционная неустойчивость. Для сравнения на рис. 2 приведена область неустойчивости в параболической аппроксимации дисперсионной зависимости (1), что соответствует использованию нелинейного уравнения Шредингера, при той же амплитуде волны:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{i}{4} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{i}{4} |A|^2 A. \quad (20)$$

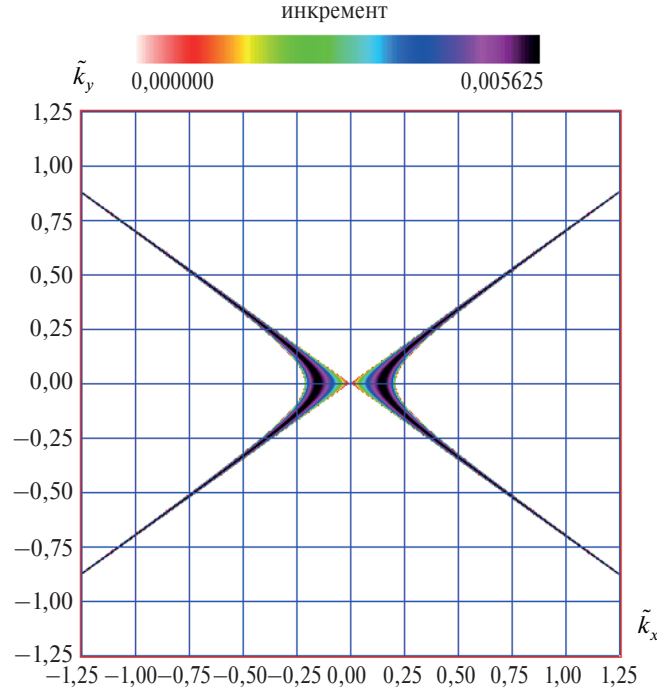


Рис. 2. Области неустойчивости гравитационных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при параболической аппроксимации линейной дисперсии без нелинейной дисперсии для амплитуды волны $A = 0,15$

Fig. 2. Regions of instability of gravity waves on a plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ with a parabolic approximation of linear dispersion without non-linear dispersion for the wave amplitude $A = 0.15$

Она имеет характерный вид «усов», уходящих в бесконечность под углами $\varphi \sim \pm \arctg(1/\sqrt{2})$, причем амплитуда инкремента не убывает вблизи $\tilde{k}_x = \pm\sqrt{2}\tilde{k}_y$ при уходе на бесконечность.

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что линейная дисперсия волн возмущений на воде приводит к ограничению области неустойчивости, но не меняет величины инкремента.

3. Влияние дисперсии нелинейности гравитационных поверхностных волн

Выше мы не касались влияния дисперсии нелинейности. Рассмотрим её проявление на примере гравитационных волн на воде. Следуя Dysthe K.B. [18] и Hogan S.J. [19], используем следующие уравнения для описания огибающей волн в лабораторной системе координат:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{2i}{\omega_0} L(\mathbf{k}_0) A - 2iA + \frac{i}{4} |A|^2 A - \frac{1}{8} A^2 A_x^* - \frac{3}{4} |A|^2 A_x + i\Phi_x A. \quad (21)$$

и усреднённого потенциала Φ :

$$\Delta\Phi = 0. \quad (22)$$

Граничные условия для потенциала заключаются в обращении его в нуль на большой глубине при $z \rightarrow -\infty$, и выполнении равенства

$$\Phi_z = \frac{1}{4} |A|^2 \Big|_x \quad (23)$$

на поверхности жидкости при $z = 0$. В (21) сохранены только кубичные по A члены. Используя вышеописанную методику для инкремента возмущений, нормированного на несущую частоту, получим следующее выражение:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{|A|^4}{4} \left[\left(1 - \frac{\tilde{k}_x^2}{K} \right)^2 - \left(\frac{\tilde{k}_x}{2} \right)^2 \right] - \left[2\omega_+ + 2\omega_- - 4 + \frac{|A|^2}{2} \left(1 - \frac{\tilde{k}_x^2}{K} \right) \right]^2}, \quad (24)$$

где $K = \sqrt{\tilde{k}_x^2 + \tilde{k}_y^2}$, $\omega_+ = \sqrt{\sqrt{(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2}}$ и $\omega_- = \sqrt{\sqrt{(1 - \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2}}$. Отметим, что присутствие потенциального течения (член с Φ_x в (22)) ведет к уменьшению эффективной амплитуды волны (именно изменяет $|A|^2$ на $|A|^2(1 - \tilde{k}_x^2/K)$ в выражении (24) по сравнению с (18)). Это уменьшение амплитуды сужает области неустойчивости и уменьшает инкремент в ней. Член $A^2 A_x^*/8$ дает поправку $\sim \tilde{k}_x^2/4$ в (24) и уменьшает инкремент при сильной расстройке. Области неустойчивости на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ для амплитуды $A = 0,15$ показаны на рис. 3.

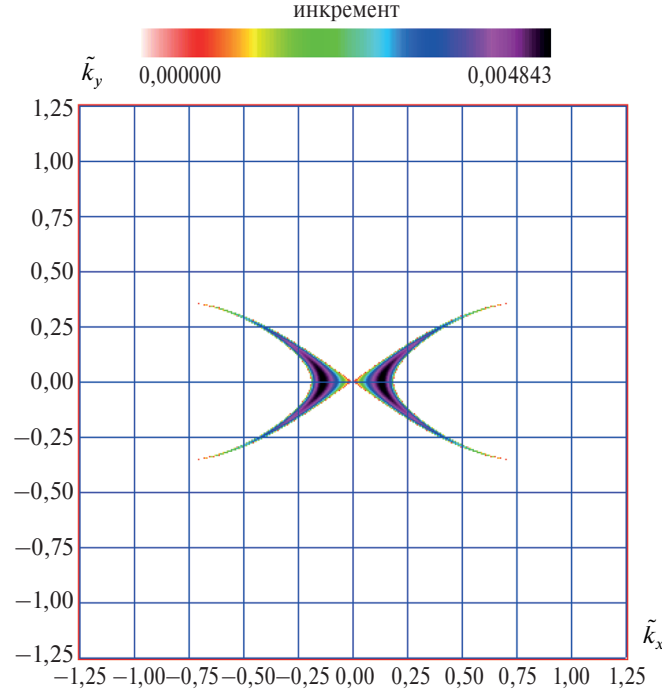


Рис. 3. Области неустойчивости гравитационных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при учете полной линейной и нелинейной дисперсий для амплитуды волны $A = 0,15$

Fig. 3. Regions of instability of gravity waves on the plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$, taking into account the total linear and nonlinear dispersions for the wave amplitude $A = 0.15$

Из сравнения рис. 3, где учитывается нелинейная дисперсия, с рис. 1 и рис. 2, где она не учитывалась, следует, что последняя уменьшает инкременты, особенно при больших расстройках. Лабораторные эксперименты подтверждают, что использование нелинейного уравнения Шредингера приводит к завышенным значениям инкремента неустойчивости при больших расстройках [20]. Сравнение численных результатов, приведенных в [21], полученных с использованием теории [9, 10], показывает их согласие с полученными выше. Область неустойчивости сужается вследствие нелинейной дисперсии.

4. Влияние капиллярных эффектов на неустойчивость волн на поверхности жидкости

Для гравитационно-капиллярных волн на поверхности жидкости, когда учитывается поверхностное натяжение, дисперсионное уравнение имеет форму [15, 22, 23]:

$$\omega = \sqrt{g|\mathbf{k}_0| \left(1 + \bar{T}|\mathbf{k}_0|^2\right)}, \quad (25)$$

где $\bar{T} = \gamma/g$, γ — нормированный на плотность воды коэффициент поверхностного натяжения. Мы введем безразмерный коэффициент $\tilde{T} = \bar{T}k_0^2$. Сначала рассмотрим случай отсутствия нелинейной дисперсии. Уравнение, описывающее распространение волнового пакета в безразмерных переменных имеет форму:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{2i}{\omega_0} \tilde{L}(\mathbf{k}_0) A - 2i\tilde{\omega} A + \frac{iq\tilde{\omega}}{4} |A|^2 A, \quad (26)$$

где $\tilde{L}(\mathbf{k}_0) A = \frac{1}{(2\pi)^s} \iint \tilde{F}(\mathbf{k}_0 + \mathbf{k}') \exp[-i\mathbf{k}\mathbf{r} + i\mathbf{k}'\mathbf{r}'] \bar{A}(\mathbf{r}') d\mathbf{k}' d\mathbf{r}'$,

$$\tilde{F}(\mathbf{k}_0 + \mathbf{k}') = \omega_0 \sqrt{\sqrt{(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2} \left\{ 1 + \tilde{T} \left[(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2 \right] \right\}}, \quad \tilde{\omega} = \sqrt{1 + \tilde{T}},$$

Равенство (26) описывает самовоздействие гравитационно-капиллярных волн, в частности, модуляционную неустойчивость. Ее инкремент дается формулой:

$$h = \frac{\tilde{\omega}}{2} \sqrt{\frac{q^2 |A|^4}{4} - \left[\frac{2\Omega_+}{\tilde{\omega}} + \frac{2\Omega_-}{\tilde{\omega}} - 4 + \frac{q|A|^2}{2} \right]^2}, \quad (27)$$

где $\Omega_+ = \sqrt{\sqrt{(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2} + \tilde{T} \left(\sqrt{(1 + \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2} \right)^3}$, $\Omega_- = \sqrt{\sqrt{(1 - \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2} + \tilde{T} \left(\sqrt{(1 - \tilde{k}_x)^2 + \tilde{k}_y^2} \right)^3}$, $q = \frac{1 + \tilde{T}/8 + \tilde{T}^2/4}{(1 + \tilde{T})(1 - 2\tilde{T})}$.

Поверхностное натяжение слабо влияет на длинные волны. Так, область ненулевого инкремента практически не отличается от показанной на рис. 1 для волны длиной $\lambda \approx 2,5$ м и амплитудой $\bar{A} = 0,03$ м, распространяющейся с групповой скоростью $V_0 = 1$ м/с на границе вода-воздух со значением коэффициента натяжения $\gamma = 70$ см³/с² [22,23] и, следовательно, $\bar{T} \approx 0,000007$ м². Безразмерные параметры равны соответственно: амплитуда $A = 0,15$ и $\tilde{T} = 0,000042$.

Структура неустойчивости меняется для волн, распространяющихся с минимальными фазовыми и групповыми скоростями. Влияние поверхностного натяжения начинается при параметре $\tilde{T} \approx 0,05$. Области неустойчивости на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ для $\tilde{T} = 0,083$ и $\tilde{T} = 0,203$, что соответствует волнам с длиной волны $\lambda \approx 0,058$ м и $\lambda \approx 0,036$ м, распространяющимся со скоростью $V_0 = 0,18$ м/с, и $V_0 = 0,176$ м/с, представлена на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Область неустойчивости суживается (рис. 4) и потом исчезает при $\tilde{k}_x \approx 0$.

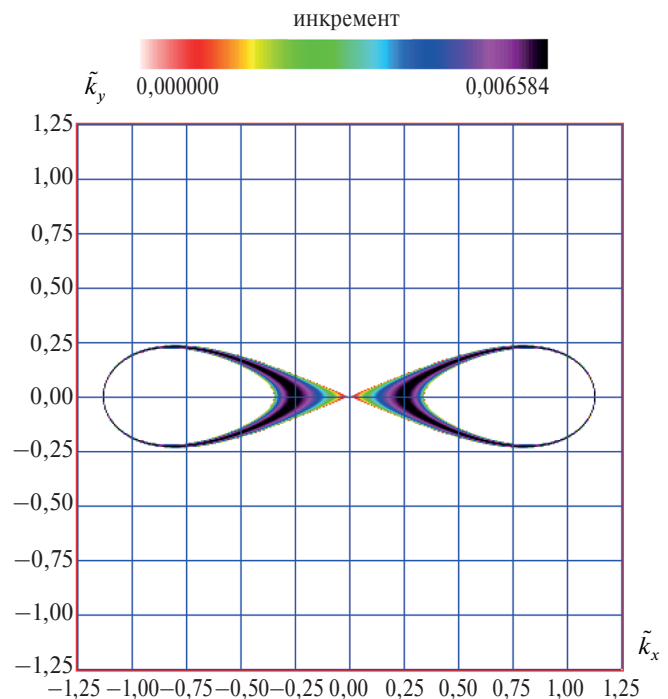
Границы исчезновения области неустойчивости могут быть определены из следующих соображений. Мы запишем параболическую аппроксимацию уравнения (26). Она имеет форму:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{i}{4} \left(\frac{(1 + 3\tilde{T})^2}{(1 + \tilde{T})^{3/2}} - \frac{12\tilde{T}}{(1 + \tilde{T})^{1/2}} \right) \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{i(1 + 3\tilde{T})}{2(1 + \tilde{T})^{1/2}} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{iq(1 + \tilde{T})^{1/2}}{4} |A|^2 A. \quad (28)$$

Неустойчивость исчезает, когда коэффициент при второй производной по x обращается в нуль (изменяет знак) при $\tilde{T} = 0,155$, длине волны $\lambda = 0,0433$ м, распространяющейся с групповой скоростью $V_0 \approx 0,176$ м/с. Более точный анализ с помощью уравнения (26) показывает, что область ненулевого инкремента сначала отдалается от нулевой точки и при длине волны $\lambda = 0,0261$ м на скорости $V_0 = 0,188$ м/с вся область становится

Рис. 4. Области неустойчивости гравитационно-капиллярных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при учете полной линейной дисперсии без нелинейной дисперсии для амплитуды волны $A = 0,15$, поверхностного натяжения $\bar{T} = 0,000007$ м² и скорости $V_0 = 0,180$ м/с

Fig. 4. Regions of instability of gravity-capillary waves on a plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ taking into account the full linear dispersion without nonlinear dispersion for the wave amplitude $A = 0,15$, the surface tension $\bar{T} = 0,000007$ м² and velocity $V_0 = 0,180$ м/с



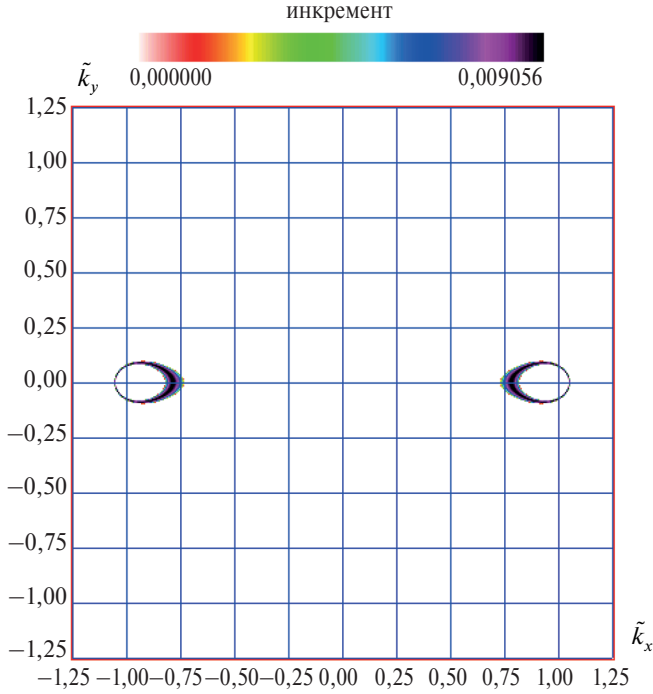


Рис. 5. Области неустойчивости гравитационно-капиллярных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при учете полной линейной дисперсии без нелинейной дисперсии для амплитуды волны $A = 0,15$, поверхностного натяжения $\bar{T} = 0,000007$ м² и скорости $V_0 = 0,176$ м/с

Fig. 5. Regions of instability of gravity-capillary waves on a plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ taking into account the full linear dispersion without nonlinear dispersion for the wave amplitude $A = 0.15$, the surface tension $\bar{T} = 0.000007$ m² and velocity $V_0 = 0.176$ m/s

устойчивой. При дальнейшем уменьшении длины волны до $\lambda = 0,0236$ м и увеличении скорости до $V_0 = 0,195$ м/с, модуляционная неустойчивость возникает вновь. Она приобретает черты «коллапса», когда область неустойчивости становится эллиптической. Последняя показана на рис. 6 для длины волны $\lambda = 0,016$ м и скорости $V_0 = 0,232$ м/с. Заметим, что в области «коллапса» существуют сильные неустойчивости [10], которые не описываются уравнением (26).

Для гравитационно-капиллярных волн с учетом полной линейной и нелинейной дисперсий согласно [18, 19] уравнение для пакетов имеет форму:

$$\frac{\partial A}{\partial \tilde{t}} = \frac{2i}{\omega_0} \tilde{L}(\mathbf{k}_0) A - 2i\tilde{\omega} A + \frac{iq\tilde{\omega}}{4} |A|^2 A - \frac{\bar{u}q\tilde{\omega}}{8} A^2 A_x^* - \frac{3\bar{v}\tilde{\omega}}{4} |A|^2 A_x + i\Phi_x A_x, \quad (29)$$

где потенциальная функция удовлетворяет уравнению (22) с граничным условием на поверхности жидкости ($z = 0$):

$$\Phi_z = \frac{\tilde{\omega}}{4} |A|^2 \Big|_x \quad (30)$$

и коэффициенты

$$\bar{u} = \frac{1 - \tilde{T}}{1 + \tilde{T}}, \quad \bar{v} = \frac{1 - \tilde{T}/8 + 9\tilde{T}^2/4 - \tilde{T}^3/2 + \tilde{T}^4/2}{(1 + \tilde{T})^2(1 - 2\tilde{T})^2}. \quad (31)$$

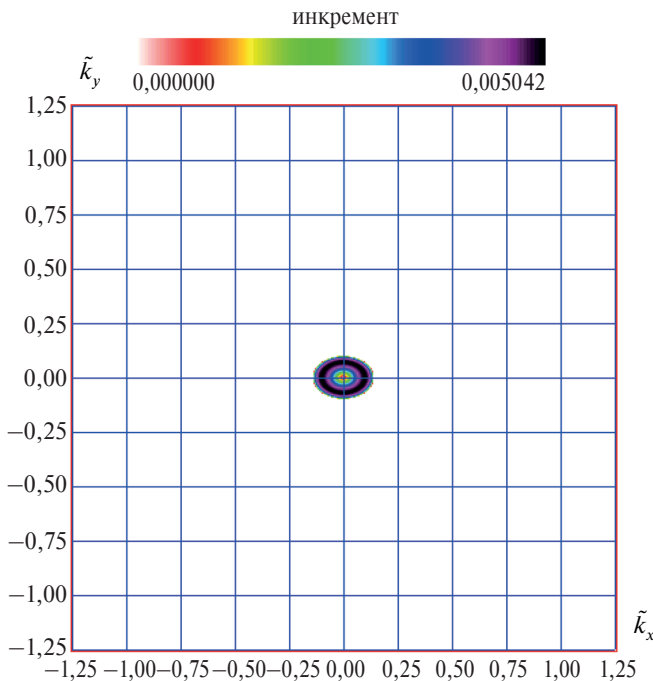


Рис. 6. Области неустойчивости гравитационно-капиллярных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при учете только полной линейной дисперсии без нелинейной для амплитуды волны $A = 0,15$, поверхностного натяжения $\bar{T} = 0,000007$ м² и скорости $V_0 = 0,232$ м/с

Fig. 6. Regions of instability of gravity-capillary waves on a plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ taking into account the full linear dispersion without nonlinear dispersion for the wave amplitude $A = 0.15$, the surface tension $\bar{T} = 0.000007$ m² and velocity $V_0 = 0.232$ m/s

В этом случае инкремент записывается как

$$h = \frac{\omega}{2} \sqrt{\frac{|A|^4}{4} \left[\left(q - \frac{\tilde{k}_x^2}{K} \right)^2 - \left(\frac{q\tilde{u}\tilde{k}_x}{2} \right)^2 \right] \left[\frac{2\Omega_+}{\tilde{\omega}} + \frac{2\Omega_-}{\tilde{\omega}} - 4 + \frac{|A|^2}{2} \left(q - \frac{\tilde{k}_x^2}{K} \right) \right]^2}. \quad (32)$$

Нелинейная дисперсия в гравитационно-капиллярных волнах, как и в гравитационных волнах, ведет к подавлению неустойчивости при больших расстройках. Это видно из сравнения областей неустойчивости на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при $A = 0,15$, $\tilde{T} = 0,203$ и с учетом нелинейной дисперсии (рис. 7) и в ее отсутствии (рис. 5). В области существования неустойчивости типа «коллапса» нелинейная дисперсия ведет к сужению области неустойчивости и уменьшению инкремента в них. Это дает возможность описывать на основе предлагаемых уравнений распространение гравитационно-капиллярных волн на больших временах. Последнее верно как для гравитационных, так и гравитационно-капиллярных волн.

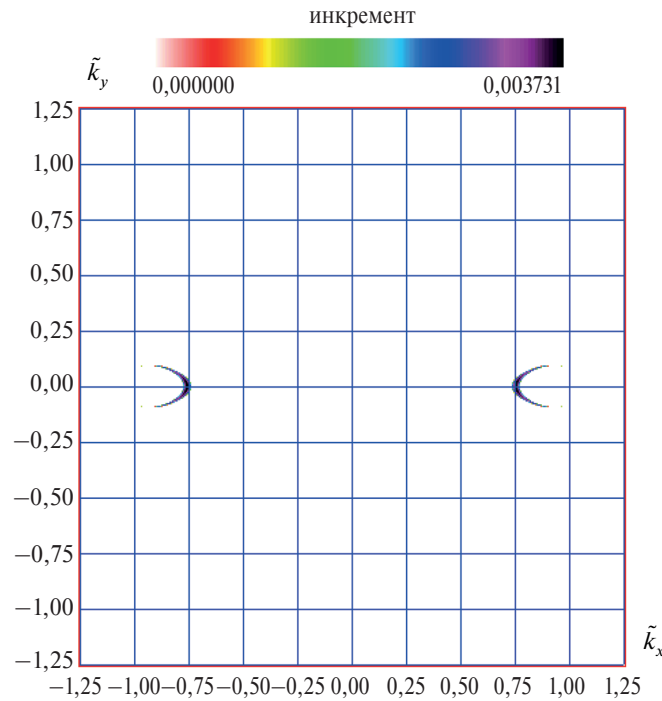


Рис. 7. Области неустойчивости гравитационно-капиллярных волн на плоскости $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ при учете полной линейной и нелинейной дисперсий для амплитуды волны $A = 0,15$, поверхностного натяжения $\tilde{T} = 0,000007 \text{ м}^2$ и скорости $V_0 = 0,176 \text{ м/с}$

Fig. 7. Regions of instability of gravity-capillary waves on a plane $(\tilde{k}_x, \tilde{k}_y)$ taking into account the full linear and nonlinear dispersion for the wave amplitude $A = 0.15$, the surface tension $\tilde{T} = 0,000007 \text{ м}^2$ and velocity $V_0 = 0.176 \text{ м/с}$

5. Заключение

Построена теория неустойчивости гравитационно-капиллярных волн на поверхности жидкости с учетом линейной и нелинейной дисперсий на основе интегродифференциального оператора. Исследованы инкременты неустойчивости. Выявлено, что использование интегродифференциального оператора для описания линейной дисперсии волн приводит к ограничению области неустойчивости по сравнению со случаем использования нелинейного уравнения Шредингера, а дисперсия нелинейности уменьшает инкременты, особенно при больших расстройках. Определены области неустойчивости. Показано, что структура неустойчивости для волн, распространяющимися с минимальными фазовыми и групповыми скоростями, меняется: область неустойчивости суживается и потом исчезает. Продемонстрировано, что при дальнейшем

уменьшении длины волны неустойчивость возникает вновь и приобретает черты «коллапса», когда область неустойчивости становится эллиптической. При этом нелинейная дисперсия ведет к сужению области неустойчивости и уменьшению инкремента в них, что дает возможность описывать на основе предлагаемых уравнений распространение гравитационно-капиллярных волн на больших временах.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00363, <https://rscf.ru/project/24-27-00363/>.

Funding

The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation No 24-27-00363, <https://rscf.ru/project/24-27-00363/>.

Литература

1. Беспалов В.И., Таланов В.И. О нитевидной структуре пучков света в нелинейной жидкости // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1966. Т. 3, Вып. 12, С. 471.
2. Benjamin T.B., Feir J.E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory // Journal of Fluid Mechanics. 1967. Vol. 27, N 3. P. 417–430. doi:10.1017/S002211206700045X
3. Lighthill M.J. Contribution to the theory of waves in non-linear dispersive system // IMA Journal of Applied Mathematics. 1965. Vol. 1. P. 269–306. doi:10.1093/IMAMAT/1.3.269
4. Беспалов В.И., Литвак А.Г., Таланов В.И. Самовоздействие электромагнитных волн в кубических изотропных средах // Сб. Нелинейная оптика. Труды 2-го Всесоюзного симпозиума по нелинейной оптике / Под ред. Хохлова Р.В. Новосибирск: Наука, 1968. С. 428–463.
5. Власов С.Н., Таланов В.И. Самофокусировка волн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1997, 218 с.
6. Островский Л.А. Распространение волновых пакетов и пространственно-временная самофокусировка в нелинейной среде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1967. Т. 51, Вып. 4(10). С. 1189–1194.
7. Hsu H.C., Kharif C., Abid M., Chen Y.Y. A nonlinear Schrödinger equation for gravity–capillary water waves on arbitrary depth with constant vorticity. Part 1 // Journal of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 854. P. 146–163. doi:10.1017/jfm.2018.627
8. Liao B., Dong G., Ma Y., Ma X., Perlin M. Modified nonlinear Schrödinger equation for gravity waves with the influence of wind, currents, and dissipation // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35, N3. doi:10.1063/5.0137966
9. Захаров В.Е. О неустойчивости волн в нелинейной среде с дисперсией // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1967. Т. 51, Вып. 4. С. 1107–1114.
10. Захаров В.Е. Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. Вып. 2. С. 86–94.
11. Захаров В.Е. Гамильтоновский формализм для волн в нелинейных средах с дисперсией // Известия вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 4. С. 431–453.
12. Власов С.Н., Копосова Е.В., Таланов В.И. Использование декомпозиции волновых уравнений и псевдо-дифференциальных операторов для описания непараксиальных пучков и широкополосных пакетов волн // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 4. С. 321–335.
13. Guyenne P., Kairzhan A., Sulem C. A Hamiltonian Dysthe equation for deep-water gravity waves with constant vorticity // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 949, A50. doi:10.1017/jfm.2022.747
14. Баханов В.В., Таланов В.И. Трансформация нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // Сб. научн. труд. Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование / Под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова. Н. Новгород: 1999. Т. 1. С. 81–107.
15. Bachanov V.V., Vlasov S.N., Kazakov V.I., Kemarskaya O.N., Kuposova E.V., Talanov V.I. Nonlinear surface wave modulation by an inhomogeneous flow // Progress in nonlinear science. Proceedings of the International Conference dedicated to the 100th Anniversary of A.A. Andronov. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS, University of Nizhny Novgorod, 2002. Volume II. Frontiers of Nonlinear Science. P. 201–208.
16. 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.
17. Chowdhury D., Debsarma S. Fifth-order evolution equation of gravity–capillary waves // The ANZIAM Journal. 2017. Vol. 59, Iss. 1. P. 103–114. doi:10.1017/S144618111700027X

18. Dysthe Kristian B. Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for application to deep water waves // Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. 1979. Vol. 369. P. 105–114. doi:10.1098/rspa.1979.0154
19. Hogan S.J. The fourth-order evolution for deep-water gravity-capillary waves // Proceedings of the Royal Society of London, A. Mathematical and Physical Sciences. 1985. Vol. A402, P. 359–372. doi:10.1098/rspa.1985.0122
20. Ma Y., Ma X., Perlin M. Extreme waves generated by modulational instability on adverse currents // Physics of Fluids. 2013. T. 25. № 11. doi:10.1063/1.4832715
21. Yuen H.C., Lake B.M. Nonlinear dynamics of deep-water gravity waves // Advances in Applied Mechanics. 1982. Vol. 22. P. 67–229. doi:10.1016/S0065-2156(08)70066-8
22. Океанология. Физика океана. том 2. Гидродинамика океана / ред. Каменкович В.М., Монин А.С. Наука: Москва, 1978. 456 с. С. 154–155.
23. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана / Пер. с англ., под ред. Кагана Б.М., Чаликова Д.В. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 320 с.

References

1. Bespalov V.I., Talanov V.I. Filamentary Structure of Light Beams in Nonlinear Liquids. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 1966;3(12):307–310.
2. Benjamin T.B., Feir J.E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory. *Journal of Fluid Mechanics*. 1967;27(3):417–430. doi:10.1017/S002211206700045X
3. Lighthill M.J. Contribution to the theory of waves in non-linear dispersive system. *IMA Journal of Applied Mathematics*. 1965;1:269–306. doi:10.1093/IMAMAT/1.3.269
4. Bespalov V.I., Litvak A.G., Talanov V.I. Self-action of electromagnetic waves in cubic isotropic media. *Nonlinear optics. Proceedings of the 2nd All-Union Symposium on Nonlinear Optics* / Ed. by Khokhlov R.V. Novosibirsk: Nauka; 1968. P. 428–463 (in Russian).
5. Vlasov S.N., Talanov V.I. *Self-focusing of waves*. Nizhnii Novgorod: IPF RAS Publ.; 1997. 218 p. (in Russian).
6. Ostrovskii L.A. Propagation of Wave Packets and Space-time Self-focusing in a Nonlinear Medium. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1967;24(4):797–800.
7. Hsu HC, Kharif C, Abid M, Chen YY. A nonlinear Schrödinger equation for gravity–capillary water waves on arbitrary depth with constant vorticity. Part 1. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018;854:146–163. doi:10.1017/jfm.2018.627
8. Liao B., Dong G., Ma Y., Ma X., Perlin M. Modified nonlinear Schrödinger equation for gravity waves with the influence of wind, currents, and dissipation. *Physics of Fluids*. 2023;35(3):037103. doi:10.1063/5.0137966
9. Zakharov V.E. The Instability of Waves in Nonlinear Dispersive Media. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1967;24(4):740–744.
10. Zakharov V.E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1968;9(2):190–194. doi:10.1007/BF00913182
11. Zakharov V.E. The Hamiltonian Formalism for waves in nonlinear media having dispersion. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1974;17(4):326–343. doi:10.1007/BF01036794
12. Vlasov S.N., Kuposova E.V., Talanov V.I. Use of decomposition of the wave equations and pseudo-differential operators for the description of nonparaxial beams and broadband wave packets. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2006;49(4):288–301. doi:10.1007/s11141-006-0062-9
13. Guyenne P, Kairzhan A, Sulem C. A Hamiltonian Dysthe equation for deep-water gravity waves with constant vorticity. *Journal of Fluid Mechanics*. 2022;949: A50. doi:10.1017/jfm.2022.747
14. Bakhanov V.V., Talanov V.I. Transformation of nonlinear surface waves in the field of inhomogeneous flows. *Proceedings of «The near-surface layer of the ocean. Physical processes and remote sensing»* / Ed. by E.N. Pelinovskii, V.I. Talanov. N. Novgorod; 1999;1:81–107 (in Russian).
15. Bakhanov V.V., Vlasov S.N., Kazakov V.I., Kemarskaya O.N., Kuposova E.V., Talanov V.I. Nonlinear surface wave modulation by an inhomogeneous flow. *Progress in nonlinear science. Volume II. Frontiers of Nonlinear Science. Proceedings of the International Conference dedicated to the 100th Anniversary of A.A. Andronov*. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS, University of Nizhny Novgorod; 2002. P. 201–208.
16. Bakhanov V.V., Vlasov S.N., Kazakov V.I., Kemarskaya O.N., Kuposova E.V., Shishkina O.D. 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(7):486–501. doi:10.1023/B: RAQE.0000019865.97760.2c
17. Chowdhury D, Debsarma S. Fifth-order evolution equation of gravity–capillary waves. *The ANZIAM Journal*. 2017;59(1):103–114. doi:10.1017/S144618111700027X

18. Dysthe K.B. Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for application to deep water waves. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1979;369:105–114. doi:10.1098/rspa.1979.0154
19. Hogan S.J. The fourth-order evolution for deep-water gravity-capillary waves. *Proceedings of the Royal Society. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1985;402(1823):359–372. doi:10.1098/rspa.1985.0122
20. Ma Y., Ma X., Perlin M., Dong G. Extreme waves generated by modulational instability on adverse currents. *Physics of Fluids*. 2013, 25(11), 4109. doi:10.1063/1.4832715
21. Yuen H.C., Lake B.M. Nonlinear dynamics of deep-water gravity waves. *Advances in Applied Mechanics*. 1982, 22, 67–229. doi:10.1016/S0065–2156(08)70066–8
22. *Oceanology. Ocean Physics*. Volume 2. Ocean Hydrodynamics / Ed. by Kamenkovich V.M., Monin A.S. Moskva: Nauka; 1978. 456 p. P. 154–155. (in Russian).
23. Phillips O.M. *The Dynamics of the Upper Ocean, 2nd Edition*. Cambridge University Press; 1977. 336 p.

Об авторах

БАХАНОВ Виктор Владимирович, ведущий научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0009-0004-1075-4401, WoS ResearcherID: ISV-2716-2023, Scopus AuthorID: 6603623205, SPIN-код (РИНЦ): 1031-9060, e-mail: bakh@ipfran.ru

ВЛАСОВ Сергей Николаевич, ведущий научный сотрудник ИПФ РАН, доктор физико-математических наук, Scopus AuthorID: 9635365600, РИНЦ AuthorID: 18637, e-mail: vlasov@ipfran.ru

КОПОСОВА Елена Викторовна, старший научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-8066-8980, WoS ResearcherID: ABA-2386-2021, Scopus AuthorID: 6603370107, SPIN-код (РИНЦ): 7273-7934, e-mail: ev_koposova@ipfran.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-5

УДК 551.463.5:547.979.7(262.5)

© Т. Я. Чурилова*, Е. Ю. Скороход, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева, 2025

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, д. 2

*tanya.churilova@ibss-ras.ru

КОНЦЕНТРАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А» И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ОКРАШЕННЫМ РАСТВОРЕННЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ В ЧЕРНОМ МОРЕ ЗИМОЙ (2018) И ЛЕТОМ (2020)

Статья поступила в редакцию 15.04.2024, после доработки 21.02.2025, принята в печать 13.03.2025

Аннотация

В работе были использованы результаты исследований в Черном море в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» — с 24 ноября по 10 декабря 2018 г. (PV105), с 4 по 24 июня 2020 г. (PV113). Получены новые для Черного моря данные о поглощении света окрашенным растворенным органическим веществом (CDOM) в зимний и летний периоды года. Зимой в поверхностном слое моря содержание CDOM, маркером которого является показатель поглощения $a_{CDOM}(438)$ ($0,10 \pm 0,015 \text{ м}^{-1}$), превышало летние значения ($0,062 \pm 0,025 \text{ м}^{-1}$). Сезонных различий по средним значениям спектрального наклона (S_{CDOM}) не установлено ($0,019 \text{ нм}^{-1}$). Однако, вариабельность значений S_{CDOM} летом отмечена в более широком диапазоне ($0,015$ до $0,026 \text{ нм}^{-1}$), чем зимой ($0,017$ – $0,021 \text{ нм}^{-1}$). Высокие летние значения S_{CDOM} являются следствием фотодеструкции CDOM в поверхностном слое моря летом. Установлена обратная связь между $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} , которая описывается степенной зависимостью. Показаны сезонные различия в содержании хлорофилла a (TChl- a) в верхнем квазиоднородном слое ($1,1 \pm 0,43 \text{ мг м}^{-3}$ зимой и $0,32 \pm 0,11 \text{ мг м}^{-3}$ летом) и в характере вертикального распределения TChl- a , обусловленные гидрологической структурой вод: зимой — однородное распределение в пределах верхнего квазиоднородного слоя, который соизмерим или превышает зону фотосинтеза, летом — наличие слоя максимальных концентраций хлорофилла a вблизи нижней границы зоны фотосинтеза. Связи между $a_{CDOM}(438)$ и TChl- a не выявлено.

Ключевые слова: окрашенное растворенное органическое вещество, спектральный показатель поглощения света, спектральный наклон, хлорофилл a , Черное море

© Т. Я. Чурилова*, Е. Ю. Скороход, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева, 2025

А.О. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 2 Nakhimov Ave., Sevastopol, 299011, Russia

*tanya.churilova@ibss-ras.ru

CHLOROPHYLL “A” CONCENTRATION AND LIGHT ABSORPTION BY COLORED DISSOLVED ORGANIC MATTER IN THE BLACK SEA IN WINTER (2018) AND SUMMER (2020)

Received 15.04.2024, Revised 21.02.2025, Accepted 13.03.2025

Abstract

The study was based on the results obtained during the expeditions of the R/V “Professor Vodyanitsky” — from November 24 to December 10, 2018 (PV105), from June 4 to 24, 2020 (PV113). New data of light absorption by colored dissolved organic matter (CDOM) in the winter and summer were presented. In winter, in the sea surface layer, the light absorption coefficients of CDOM ($a_{CDOM}(438)$) ($0.10 \pm 0.015 \text{ m}^{-1}$), exceeded summer values ($0.062 \pm 0.025 \text{ m}^{-1}$). There were no seasonal differences in the mean spectral slope (S_{CDOM}) values (0.019 nm^{-1}). However, the variability of S_{CDOM} values in summer is noted in a wider range (0.015 to 0.026 nm^{-1}) than in winter (0.017 – 0.021 nm^{-1}). The highest S_{CDOM} values are resulted from photodestruction of CDOM in the sea surface layer in summer. An inverse relationship has been revealed between $a_{CDOM}(438)$ and S_{CDOM} , which is described by a power law. Seasonal differences in the content of chlorophyll a (TChl- a) in the upper mixed layer ($1.1 \pm 0.43 \text{ mg m}^{-3}$ in winter and

Ссылка для цитирования: Чурилова Т.Я., Скороход Е.Ю., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А. Концентрация хлорофилла «а» и поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом в Черном море зимой (2018) и летом (2020) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 53–65. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-5
For citation: Churilova T. Ya., Skorokhod E. Yu., Efimova T. V., Moiseeva N. A. Chlorophyll a Concentration and Light Absorption by Colored Dissolved Organic Matter in the Black Sea in Winter (2018) and Summer (2020). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):53–65. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-5

$0.32 \pm 0.11 \text{ mg m}^{-3}$ in summer) and in the type of the TChl-*a* vertical distribution, due to the water hydrological structure, were shown: in winter — uniform distribution within the upper mixed layer, which was comparable to or exceeded the photosynthesis zone, in summer — the presence of a layer of deep chlorophyll *a* maximum near the bottom of the euphotic zone. Relationship between $a_{CDOM}(438)$ and S_{CDOM} was not revealed for both seasons.

Key words: colored dissolved organic matter, spectral light absorption coefficient, spectral slope, chlorophyll *a*, the Black Sea

1. Введение

Окрашенное растворенное органическое вещество (CDOM) — это основной оптически активный компонент в водах 2-го типа по оптической классификации вод [1]. Черное море относится к водам 2-го типа [2]. Содержание и спектральные характеристики оптически активных компонентов среды — фитопланктона, взвешенного вещества и CDOM — активно исследуются в разных водоемах, начиная с 1980-х гг. [3–6] что связано с развитием спутниковой океанографии [7, 8]. Оценка показателей качества и продуктивности вод на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса выполняется с использованием алгоритмов для трансформации спектральных свойств восходящего из водной толщи излучения в конкретные биологические характеристики. Развитие спутниковых алгоритмов базируется на данных о биооптических показателях вод конкретных акваторий [1]. CDOM в водах 2-го типа доминирует в формировании светового поля, в ослаблении освещенности и изменении спектрального состава света с глубиной [9], что оказывает влияние на фотосинтетические и продукционные характеристики фитопланктона [10]. Исследования вариативности спектральных показателей поглощения света CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$) проводились в разных регионах Мирового океана [11–15]. Однако для Черного моря известно ограниченное количество таких исследований [16, 17]. В прибрежных водах в районе Крымского полуострова на основе результатов измерения $a_{CDOM}(\lambda)$ в соответствии с современным протоколом (IOCCG, 2019) выполнен анализ сезонной динамики показателей $a_{CDOM}(\lambda)$, используя параметры параметризации: показателя поглощения света на выбранной длине волны и спектрального наклона (S_{CDOM}) [16–18]. В прибрежных и глубоководных водах в районе Геленжика [18] измерения показателя поглощения света CDOM проводили с помощью интегрирующей сферы ICAM [19]. Для этих районов показана межгодовая (2017–2019 гг.) изменчивость показателей поглощения света CDOM в среднем для спектральных диапазонов (около 20 нм), для водных слоев и для периода работ в июне месяце [18]. Однако, отмеченное осреднение, отсутствие данных о S_{CDOM} и использование фильтров с размерами пор (0,4 мкм), превышающих (0,2 мкм), рекомендованные протоколом IOCCG [20], ограничивает использование этих данных для сравнительного анализа.

Цель настоящей работы состоит в исследовании изменчивости спектрального показателя поглощения света ($a_{CDOM}(\lambda)$), концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами (TChl-*a*) и связи между этими параметрами в летний и зимний периоды года в глубоководном и прибрежном районах Черного моря на основе результатов экспедиций 105 и 113 НИС «Профессор Водяницкий».

2. Методы

Работа выполнена на основе данных, полученных в глубоководном и прибрежном районах Черного моря в ходе научных экспедиций НИС Профессор Водяницкий с 24 ноября по 10 декабря 2018 г. (PV105), с 4 по 24 июня 2020 г. (PV113) (рис. 1). В прибрежных водах моря выполнено 2 станции зимой (PV105), а в летний период (PV113) была проведена более детальная съемка. В прибрежных водах Крымского полуострова выполнено 5 станций с глубинами до 50 м и 3 станции с глубинами до 85 м, около Керченского пролива 2 станции с глубинами до 50 м, и в районе северо-восточного побережья — 1 станция с глубинами до 50 м и 2 станции с глубинами 100–150 м.

Пробы воды отбирали с помощью кассеты батометров на разных горизонтах в пределах зоны фотосинтеза, а также в более глубоких слоях моря, в том числе в сероводородной зоне моря. Глубины для отбора проб в освещенном слое моря выбирали на основе данных о температуре воды, флуоресценции хлорофилла *a* и прозрачности вод.

Профили солёности, температуры и плотности воды измеряли с помощью CTD комплекса Sea-Bird's 911 в рейсе PV105 и Idronaut Ocean Seven 320 PlusM в рейсе PV113. В PV113 профили интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* (F) и фотосинтетически активной радиации (PAR) измеряли с помощью специализированных зондов (Turner Cyclops 6k, QCP-2200), интегрированных в систему CTD комплекса Idronaut Ocean Seven 320 Plus M. Температурный градиент (разность температуры воды при изменении глубины на один метр) рассчитывали на основе данных об изменении температуры с глубиной, полученных после зондирования CTD комплексом.

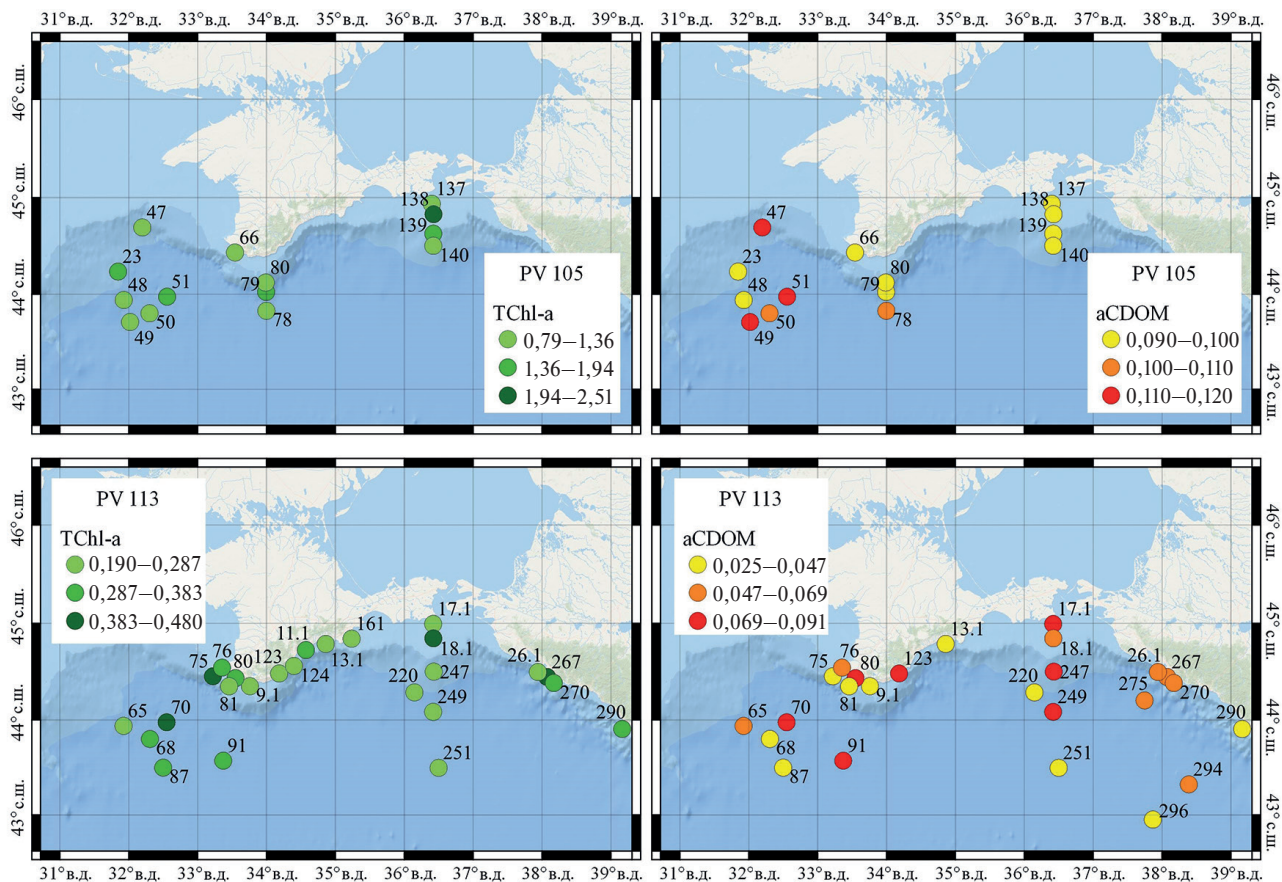


Рис. 1. Распределение концентрации хлорофилла *a* (TChl-*a*, мг м⁻³) и показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм (*a*_{CDOM}(438), м⁻¹) в поверхностном слое моря с 24 ноября по 10 декабря 2018 г. (PV105 рейс НИС «Профессор Водяницкий», верхняя панель), с 4 по 24 июня 2020 г. (PV113 рейс НИС «Профессор Водяницкий», нижняя панель)

Fig. 1. Distribution of chlorophyll *a* concentration (TChl-*a*, mg m⁻³) and the light absorption coefficient by colored dissolved organic matter at 438 nm (*a*_{CDOM}(438), m⁻¹) in the sea surface layer from 24 November to 10 December 2018 (in the research cruises PV105 R/V “Professor Vodyanitsky”, upper panel) and from 4 to 24 June 2020 (in the research cruises PV113 R/V “Professor Vodyanitsky”, bottom panel)

Зону фотосинтеза (Z_{eu}) определяли по глубине, на которую проникает 1 % от величины PAR, падающей на поверхность моря [21]. В PV105 коэффициент диффузного ослабления света в среднем для Z_{eu} и видимого диапазона излучения (400–700 нм) (K_d) рассчитывали, используя зависимость между глубиной видимости белого диска (Z_S) и K_d , установленную для Черного моря [22]. Величина Z_{eu} рассчитывалась по уравнению [9].

$$Z_{eu} = \frac{4,6}{K_d}. \quad (1)$$

Концентрацию пигментов в фитопланктоне определяли спектрофотометрическим методом [23]. Пробы воды фильтровали через стекловолоконные фильтры Whatman GF/F (диаметр 25 мм, размер пор 0,7 мкм), используя слабый вакуум (<0,2 атм). Пигменты фитопланктона экстрагировали в 90 % растворе ацетона (5 мл). Для полной экстракции пигментов использовали двухступенчатый подход и виброгомогенизатор. Экстракты осветляли центрифугированием в течение 5 мин (при центробежном ускорении 5000 g). Измерения проводили в диапазоне длин волн от 350 до 750 нм с шагом в 1 нм на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer).

Спектральные показатели поглощения света CDOM измеряли в соответствии с протоколом [20]. Пробы воды предварительно фильтровали через фильтры GF/F (Whatman), затем фильтровали через нуклеопоровые фильтры (Nucleopore, с диаметром пор 0,2 мкм), которые предварительно промывали, профильтровывая через фильтр 100 мл деионизированной воды. Оптическую плотность пробы ($OD_{CDOM}(\lambda)$) измеряли

в кварцевых кюветах в диапазоне длин волн от 250 до 750 нм с шагом в 1 нм на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer). В качестве сравнения использовали деионизированную воду. Показатель поглощения света CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$, m^{-1}) рассчитывали:

$$a_{CDOM}(\lambda) = 2,303 \frac{OD_{CDOM}(\lambda)}{l}, \quad (2)$$

где 2,303 — коэффициент перехода от логарифмов с основанием 10 к натуральным логарифмам; $OD_{CDOM}(\lambda)$ — оптическая плотность пробы; l — длина оптического пути кварцевой кюветы, $l = 0,1$ м.

Спектр $a_{CDOM}(\lambda)$ описывается экспоненциальной функцией в соответствии с [9]:

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_r) e^{(-s_{CDOM}(\lambda - \lambda_r))}, \quad (3)$$

где λ_r — это выбранная длина волны, в настоящих исследованиях $\lambda_r = 438$ нм, S_{CDOM} — спектральный наклон $a_{CDOM}(\lambda)$, в nm^{-1} . S_{CDOM} определяли методом наименьших квадратов в диапазоне длин волн 350–500 нм после логарифмирования спектра поглощения CDOM. Полученные параметры $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} позволяют восстанавливать спектр $a_{CDOM}(\lambda)$ и используются для анализа изменчивости $a_{CDOM}(\lambda)$ [24, 25] и в алгоритмах светового поля, первичной продукции [26], восстановления первичных гидрооптических характеристик по спутниковым данным [27].

3. Результаты и обсуждение

Вертикальное распределение TChl-*a* зимой (конец ноября — начало декабря 2018 г.) в Черном море имело однородный характер в пределах слоя с одинаковой температурой (рис. 2). Зимнее однородное распределение TChl-*a* в пределах верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) обусловлено характерным для этого сезона активным конвективным перемешиванием вод, вызванным охлаждением поверхностного слоя вод [28]. ВКС в период работ варьировал на большинстве станций от 23 до 42 м (в среднем составляя 34 ± 11 м) и только на 66 станции отмечено заглубление ВКС до 69 м, что, по-видимому, связано с высокой динамикой вод в этом прибрежном районе моря. Температурный градиент, ограничивающий ВКС, изменялся на порядок ($0,24$ – $2,0$ °C m^{-1}) и в среднем составлял $1,0 \pm 0,64$ °C m^{-1} . Зона фотосинтеза варьировала в узком диапазоне (24–32 м, в среднем $27 \pm 3,5$ м), за исключением одной станции (ст. 47), где Z_{eu} равнялась 18 м. Соотношение между слоями ВКС и Z_{eu} изменялось в пределах от 0,82 до 2,7 и в среднем составляло $1,3 \pm 0,49$. Это свидетельствует о том, что зона фотосинтеза на отдельных станциях была соизмерима с ВКС, а на большинстве станций зона фотосинтеза составляла только часть ВКС. Значения TChl-*a* в ВКС в районе исследований (рис. 1) изменялись в пределах $0,79$ – $2,5$ мг m^{-3} , в среднем составляя $1,1 \pm 0,43$ мг m^{-3} . Глубже ВКС отмечается резкое снижение значений TChl-*a* (рис. 2). Характер вертикального распределения TChl-*a* соответствует описанному ранее [29].

В летнее время в связи с прогревом поверхностных вод моря и сезонной стратификацией в верхней части зоны фотосинтеза формируется ВКС [28]. В июне 2020 г. ВКС в районе исследований варьировал от 5,0 до 30 м (в среднем $18 \pm 5,9$ м). Температурный градиент ($0,67$ – $3,1$ °C m^{-1} , в среднем $1,7 \pm 0,65$ °C m^{-1}) разделял зону фотосинтеза на квазиизолированные слои, которые различаются по условиям существования фитопланктона — температуре воды и освещенности (рис. 2). Следует отметить, что на отдельных станциях (примерно на половине из числа исследованных станций) отмечали двухступенчатую стратификацию вод с двумя выраженными градиентами температуры (1 °C m^{-1} и более) на глубинах 5–10 м и 15–20 м (рис. 2). Зона фотосинтеза в районе работ распространялась до глубин 22–40 м, в среднем — до $31 \pm 5,7$ м. Летом наблюдали более сложный характер вертикального распределения TChl-*a* в сравнении с зимой (рис. 2, 3). Для профиля TChl-*a* характерны низкие значения ($0,19$ – $0,48$ мг m^{-3} , в среднем $0,32 \pm 0,11$ мг m^{-3}) в ВКС и наличие глубинного максимума вблизи нижней границы зоны фотосинтеза (1 % PAR) — на глубинах 20–50 м (рис. 2, 3). В слое максимума значения TChl-*a* достигали $0,70$ – $1,2$ мг m^{-3} , что в 2–3 раза превышало значения TChl-*a* в поверхностном слое моря. На нескольких станциях из числа тех, где отмечена двухступенчатая сезонная стратификация вод в слое градиента (второго от поверхности моря), отмечен локальный максимум флуоресценции хлорофилла *a* (рис. 2). Скачок флуоресценции в плотностном градиенте может быть связан с физиологическими изменениями в клетках микроводорослей, локализованных в слое плотностного градиента, а именно увеличением внутриклеточного содержания хлорофилла *a* [29–31] как адаптивная реакция микроводорослей на снижение света на этих глубинах в сравнении с ВКС.

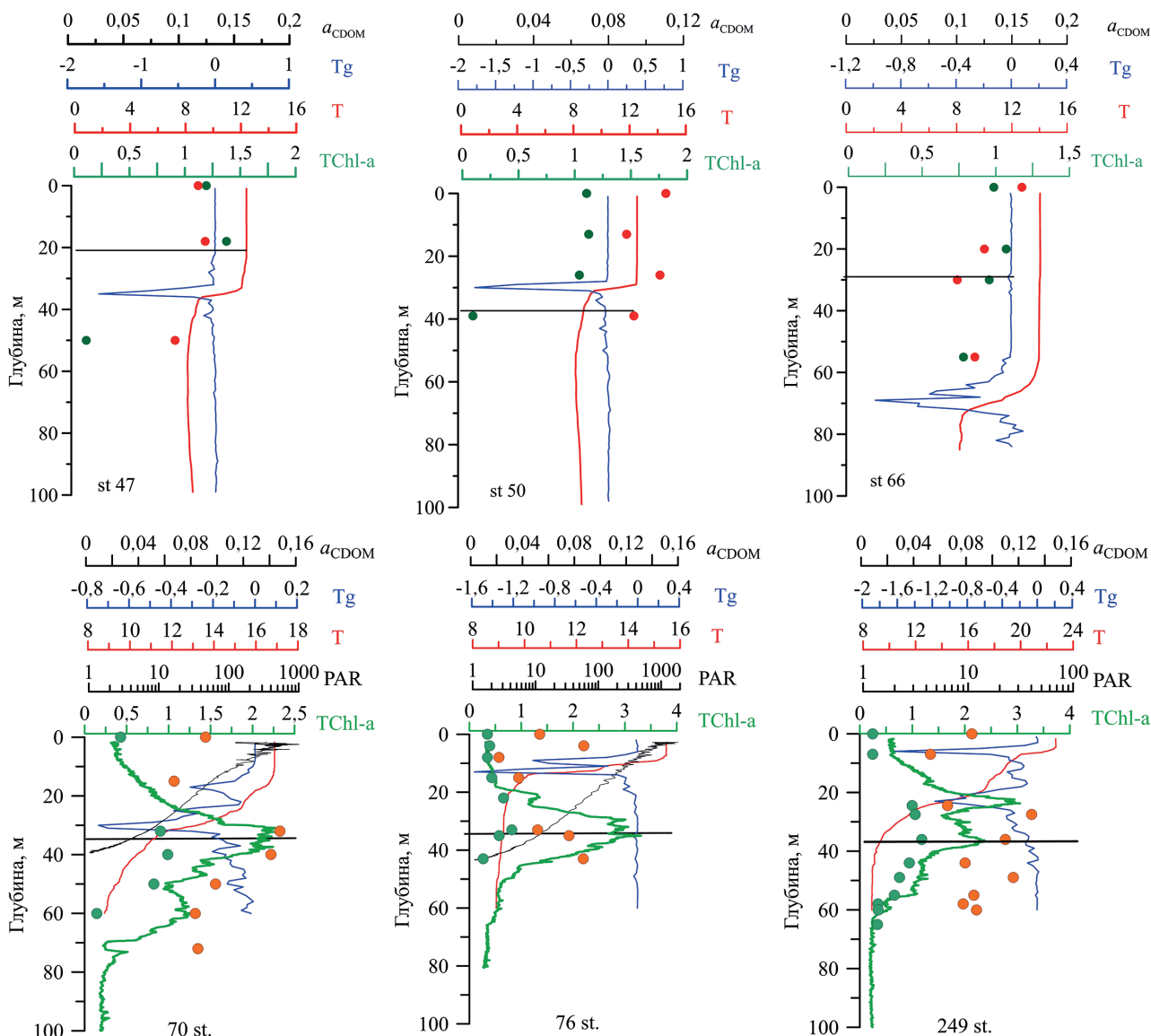


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* (TChl-*a*, mg m^{-3}) по результатам измерений его интенсивности флуоресценции погружным зондом (зеленая линия) и спектрофотометрическим методом (зеленые кружки); температуры воды (*T*, красная линия), температурного градиента (*Tg*, синяя линия), фотосинтетически активной радиации (*PAR*, черная линия) и показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм (a_{CDOM} , m^{-1} , красные символы) для отдельных станций в рейсах PV105 (верхняя панель) и PV113 (нижняя панель) НИС «Профессор Водяницкий». Черная горизонтальная линия обозначает 1 % *PAR*

Fig. 2. Vertical distribution of chlorophyll *a* concentration (TChl-*a*, mg m^{-3}) based on the results of measurements of its fluorescence intensity with a submersible probe (green line) and using the spectrophotometric method (green circles); water temperature (*T*, red line), temperature gradient (*Tg*, blue line), photosynthetically available radiation (*PAR*, black line) and light absorption coefficient by coloured dissolved organic matter at 438 nm (a_{CDOM} , m^{-1} , red symbols) for particular stations in the research cruises PV105 (top panel) and PV113 (bottom panel) R/V “Professor Vodyanitsky”. The black horizontal line shows 1 % *PAR*

Сезонные различия в вертикальном распределении TChl-*a* обусловлены сезонными особенностями гидрологической структуры, а именно наличием плотностной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза летом и ее отсутствием — зимой. Влияние соотношения между ВКС и Z_{eu} на характер вертикального распределения TChl-*a* отмечалось в разных районах Мирового океана [32], что объясняется фундаментальными закономерностями изменения содержания хлорофилла *a* в клетках фитопланктона в зависимости от условий среды [33, 34]. Наличие сезонной температурной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза приводит к формированию квазиизолированных слоев, где фитопланктон адаптируется к условиям среды в слое существования [29–31]. В результате адаптивного изменения внутриклеточной концентрации

хлорофилла *a* вертикальное распределение TChl-*a* отличается от профиля биомассы фитопланктона при условии сезонной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза [35]. На отдельных станциях (рис. 2) на профиле флуоресценции хлорофилла *a* глубже основного максимума отмечен небольшой пик на глубинах, куда проникает свет около 0,1 % PAR, падающей на поверхность моря. Такой максимум флуоресценции связан с одноклеточными цианобактериями, которые составляли основную часть биомассы фитопланктона на этих глубинах, что обусловлено их более высокой эффективностью поглощения сине-зеленого света, проникающего на эти глубины [36].

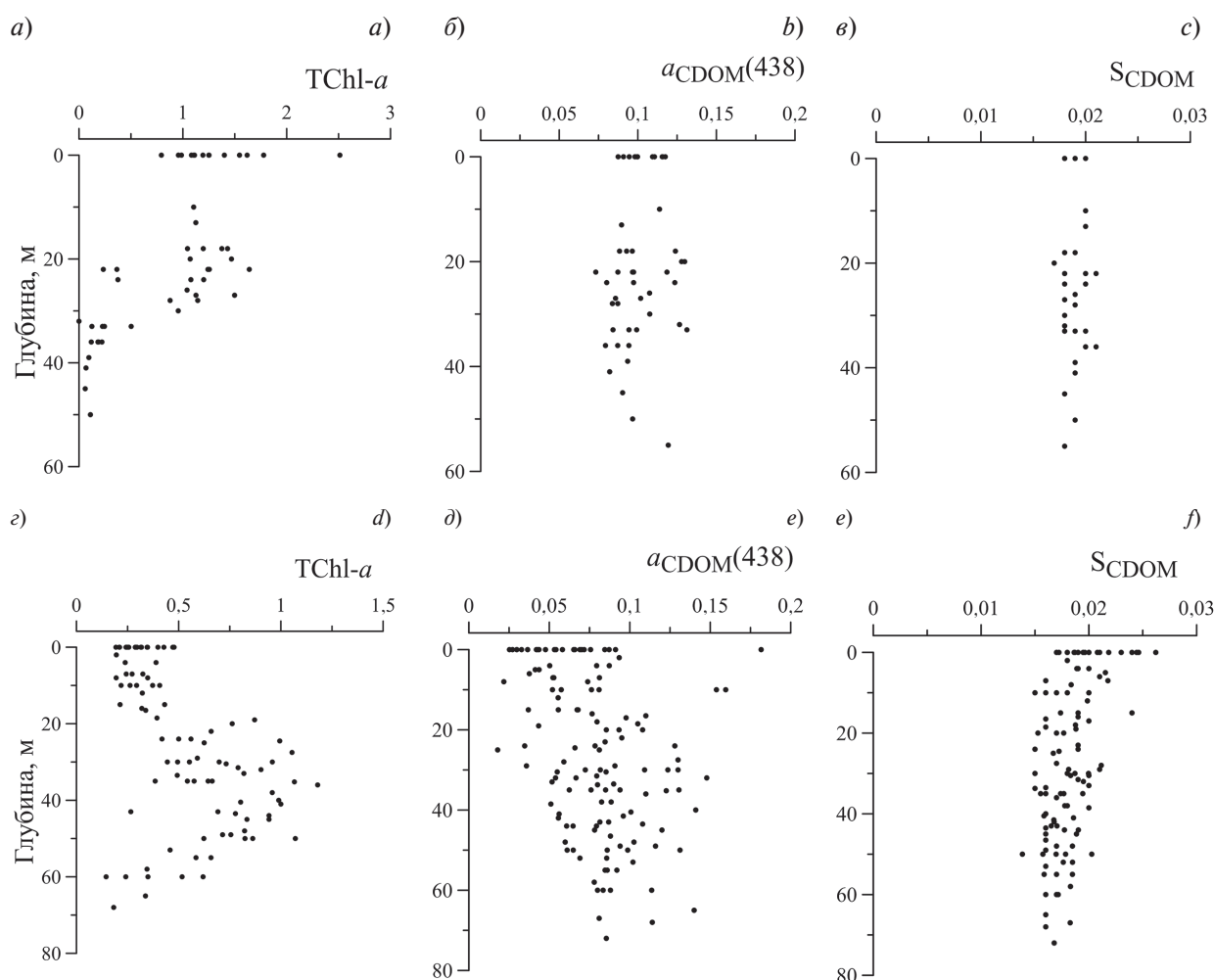


Рис. 3. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* (TChl-*a*, мг м⁻³) (а, з), показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$, м⁻¹) (б, д), спектрального наклона (S_{CDOM} , нм⁻¹) (в, е) в рейсах PV105 (верхняя панель) и PV113 (нижняя панель) НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 3. Vertical distribution of chlorophyll *a* concentration (TChl-*a*, mg m⁻³) (а, d), of the light absorption coefficient by colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$, m⁻¹) (b, e), spectral slope (S_{CDOM} , nm⁻¹) (c, f) in research cruises PV105 (top panel) and PV113 (bottom panel) of the R/V “Professor Vodyanitsky”

В конце ноября — начале декабря 2018 г. отмечено практически равномерное распределение $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} в слое 0–60 м (рис. 2, 3). Значения $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} были в пределах 0,070–0,13 м⁻¹ ($0,10 \pm \pm 0,015$ м⁻¹) и 0,017–0,021 нм⁻¹ ($0,019 \pm 0,0010$ нм⁻¹), соответственно. При этом следует отметить, что ВКС не отличался по значениям $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} от ниже расположенного слоя (рис. 3). Связи между TChl-*a* и $a_{CDOM}(438)$ не отмечено (коэффициент детерминации, $r^2 = 0,11$) (рис. 4).

В июне 2020 г. в ВКС значения $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} изменялись от 0,025 до 0,14 м⁻¹ ($0,062 \pm 0,025$ м⁻¹) и от 0,015 до 0,026 нм⁻¹ ($0,019 \pm 0,0029$ нм⁻¹), соответственно. В слое моря, расположенном глубже ВКС, значения показателя $a_{CDOM}(438)$ изменялись от 0,034 до 0,15 м⁻¹, среднее значение этого параметра ($0,086 \pm \pm 0,023$ м⁻¹) было больше, чем отмечено в ВКС ($0,062 \pm 0,025$ м⁻¹). Значения S_{CDOM} (0,014–0,021 нм⁻¹, в сред-

нем $0,018 \pm 0,0022 \text{ м}^{-1}$) в этом слое были несколько ниже значений, полученных для ВКС. На массиве летних данных очевиден тренд к увеличению значений $a_{CDOM}(438)$ с глубиной (рис. 3, д): от $0,060 \pm 0,032 \text{ м}^{-1}$ в поверхностном слое до $0,090 \pm 0,022 \text{ м}^{-1}$ глубже 40 м. В изменениях значений S_{CDOM} с глубиной наблюдается обратный по характеру тренд (рис. 3, е): от $0,019 \pm 0,032 \text{ м}^{-1}$ в поверхностном слое до $0,017 \pm 0,014 \text{ м}^{-1}$ глубже 40 м. Суточная динамика значений S_{CDOM} в поверхностном слое моря отражает повышение значений от минимальных ($0,017 \text{ м}^{-1}$) в ночное время до максимальных ($0,026 \text{ м}^{-1}$) после полудня (около 16 ч) с последующим понижением значений до $0,018 \text{ м}^{-1}$ (рис. 5, а). Суточная динамика S_{CDOM} связана с фотодеструкцией CDOM в поверхностном слое моря [37]. Под воздействием высокой освещенности высокомолекулярные органические соединения разрушаются, образуя низкомолекулярные соединения, что сопровождается увеличением S_{CDOM} и понижением $a_{CDOM}(438)$ [24]. Фотодеструкцию CDOM наблюдали в поверхностном слое моря летом (рис. 5, б). Этому периоду соответствует максимальная в годовом цикле интенсивность солнечной радиации [38], падающей на поверхность моря, и относительно узкий слой ВКС (рис. 3). В результате этого РОВ в поверхностном слое моря находится при более высокой освещенности чем зимой, когда инсоляция моря ниже [38] и слой ВКС больше (рис. 3). При этом степень проявления фотодеструкции CDOM связана со временем дня (рис. 5, а), что косвенно отражает суточную динамику интенсивности солнечной инсоляции. Между значениями S_{CDOM} и $a_{CDOM}(438)$ установлена обратная зависимость (рис. 5, б), которую отмечали и в других регионах Мирового океана [39–43]. Для летнего периода

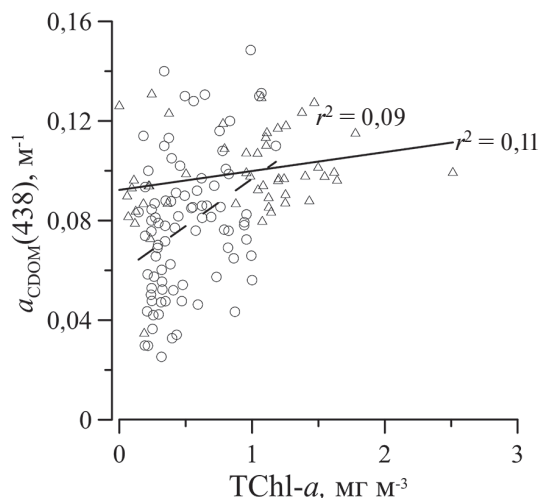


Рис. 4. Зависимость показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$, м^{-1}) от концентрации хлорофилла а (TChl-a, мг м^{-3}) в рейсах PVI05 (треугольник) и PVI13 (кружок) НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 4. Dependence of the light absorption coefficient of colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$, м^{-1}) on the chlorophyll a concentration (TChl-a, мг м^{-3}) in research cruises PVI05 (triangle) and PVI13 (circle) of the R/V “Professor Vodyanitsky”

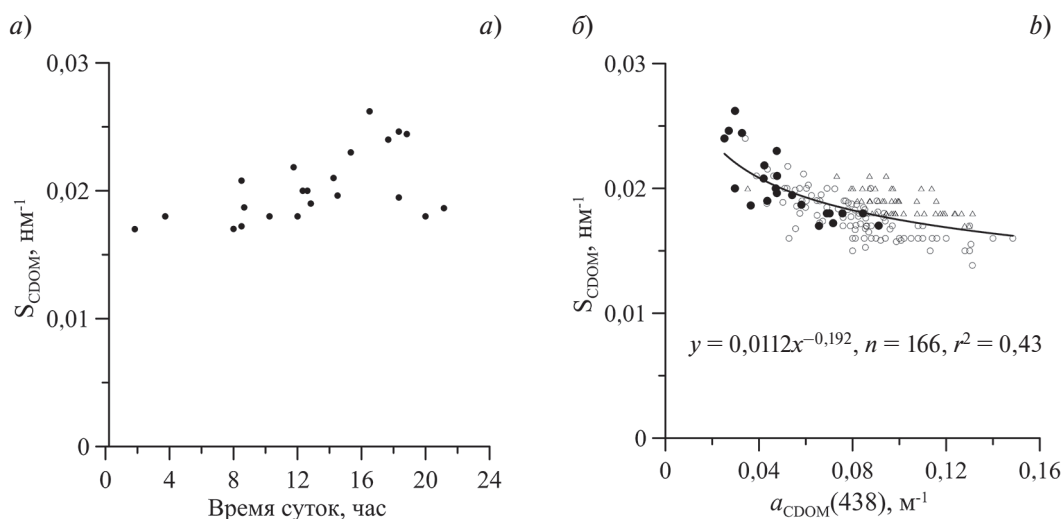


Рис. 5. Суточная динамика спектрального наклона показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом (S_{CDOM}) (а) и зависимость S_{CDOM} от показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$) в конце ноября 2018 г. (треугольник) и в июне 2020 г. (б): в поверхностном слое моря (заштрихованный кружок) и на остальных глубинах (незаштрихованный кружок)

Fig. 5. Daily dynamics of the spectral slope of the light absorption coefficient of the colored dissolved organic matter S_{CDOM} (а) and dependence on the light absorption coefficient of the colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$) at the end of November 2018 (triangle) and in June 2020 (b): in the sea surface layer (filled circle) and all depths (open circle)

аналогично зимнему не установлено связи между $a_{CDOM}(438)$ и TChl-*a* (рис. 4). В зависимости от источников поступления различают автохтонное и аллохтонное растворенное органическое вещество, частью которого является CDOM [39]. Поступление автохтонного CDOM в водную среду связано с биологической активностью фитопланктона, зоопланктона, бактерий и вирусов [39]. Аллохтонное органическое вещество привносится с суши [30], поэтому в районах, не подверженных береговому стоку, возможна корреляция между концентрацией основного фотосинтетически активного пигмента — хлорофилла *a* и содержанием CDOM, маркером которого служит $a_{CDOM}(\lambda)$. Для большинства акваторий связи между этими параметрами не установлено [11, 40, 41, 44, 45]. Это связано с тем, что содержание CDOM и его химический состав зависят от множества факторов, как биологических (фотосинтетическая активность фитопланктона, бактериальная деградация, вирусный лизис и т. д.), так и физических (фотодеструкция) [37, 39, 46, 47]. Состав CDOM определяет форму спектра поглощения света [37, 39, 48, 49]. Изменение химического состава CDOM в поверхностном слое вод часто связано с фотодеструкцией, в результате которой доля высокомолекулярных соединений CDOM уменьшается, а низкомолекулярных — увеличивается [37, 39]. В результате многофакторности и разной направленности их влияния сложно выявить связь между $a_{CDOM}(\lambda)$ и содержанием фитопланктона в акваториях, не подверженных береговому стоку и поступлению CDOM терригенной природы.

Анализ распределения $a_{CDOM}(438)$ и TChl-*a* в поверхностном слое моря показал, что диапазон изменчивости исследуемых параметров одинаковый в глубоководных и прибрежных районах (рис. 1). Для зимы получено ограниченное количество данных в прибрежных водах (2 станции), что не позволяет проводить сравнение районов. В летний период значения TChl-*a* в поверхностном слое прибрежных вод Крымского полуострова ($0,19\text{--}0,35\text{ мг м}^{-3}$), вблизи Керченского пролива ($0,20\text{--}0,47\text{ мг м}^{-3}$) не отличались от отмеченных в глубоководной части моря ($0,21\text{--}0,43\text{ мг м}^{-3}$). В районе северо-восточного побережья отмечены несколько повышенные значения TChl-*a* ($0,29\text{--}0,48\text{ мг м}^{-3}$) в сравнении с глубоководными районами. Значения показателя $a_{CDOM}(438)$ в районе Крымского полуострова ($0,030\text{--}0,076\text{ м}^{-1}$) и северо-восточного побережья моря ($0,042\text{--}0,069\text{ м}^{-1}$) соответствуют данным, полученным в глубоководных районах моря ($0,025\text{--}0,091\text{ м}^{-1}$). Повышенными значениями $a_{CDOM}(438)$ ($0,048\text{--}0,093\text{ м}^{-1}$) выделяется район вблизи Керченского пролива, что возможно, связано с поступлением вод Азовского моря, где значения $a_{CDOM}(438)$ на порядок превышают черноморские значения [50]. Однако влияния вод Азовского моря на TChl-*a* не наблюдалось, хотя исследования в этом же рейсе показали, что значения TChl-*a* в водах Азовского моря, прилегающих к Керченскому проливу, были на порядок выше, чем в Черном море [50]. Анализ причин отмеченного различия требует дополнительных исследований не только распределения концентрации биогенных элементов, но и динамики их ассимиляции в процессе фотосинтеза и выедания фитопланктона зоопланктоном, которые планируется провести в дальнейшем.

4. Заключение

Получены новые для Черного моря данные о поглощении света CDOM в зимний и летний периоды года. Зимой в поверхностном слое моря содержание CDOM, маркером которого является показатель $a_{CDOM}(438)$ ($0,10\pm 0,015\text{ м}^{-1}$), превышало летние значения ($0,062\pm 0,025\text{ м}^{-1}$). Сезонных различий по средним значениям спектрального наклона S_{CDOM} не установлено: зимой — $0,019\pm 0,0010\text{ нм}^{-1}$ и летом $0,019\pm 0,0029\text{ нм}^{-1}$. Однако вариабельность значений S_{CDOM} летом отмечена в более широком диапазоне (от $0,015$ до $0,026\text{ нм}^{-1}$), чем зимой (от $0,017$ до $0,021\text{ нм}^{-1}$), что связано с фотодеструкцией CDOM, которая ведет к повышению значений S_{CDOM} в поверхностном слое моря летом. Установлена обратная связь между $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} , которая описывается степенной зависимостью.

Установлены сезонные особенности в вертикальном распределении показателя поглощения CDOM и спектрального наклона. Для зимы характерно однородное распределение $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} в пределах всего исследованного слоя, летом отмечается тренд к увеличению с глубиной $a_{CDOM}(438)$ и снижению — S_{CDOM} .

Показаны сезонные различия в содержании хлорофилла *a* в ВКС (зимой — $1,1\pm 0,43\text{ мг м}^{-3}$ и летом — $0,32\pm 0,11\text{ мг м}^{-3}$) и в характере вертикального распределения TChl-*a*, обусловленные гидрологической структурой вод: зимой — однородное распределение в пределах ВКС, который соизмерим или превышает зону фотосинтеза, летом — наличие слоя максимальных концентраций хлорофилла *a* вблизи нижней границы зоны фотосинтеза. Связи между $a_{CDOM}(438)$ и TChl-*a* не выявлено.

Благодарности

Авторы благодарны ведущему инженеру лаборатории фотосинтеза и биооптики моря ФИЦ ИнБЮМ Землянской Е.А. за участие в отборе и первичной обработке проб.

Acknowledgments

The authors are grateful to the leading engineer of the laboratory of photosynthesis and marine bio-optics of the IBSS Zemlyanskaya E.A. for her participation in the sampling and primary processing of the samples.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124030100106–2 тема «Исследование региональных особенностей биооптических показателей водоемов как основы дешифрования данных дистанционного зондирования для оценки мультимасштабной изменчивости первично продукционных характеристик пелагических экосистем».

Funding

The present study was carried out within the framework of state assignment № 124030100106–2 “Study of regional bio-optical properties for development of satellite algorithm for assessment of multi-scale variability of primary production characteristics of pelagic ecosystems”.

Литература

1. Mobley C.D. The Oceanic Optics Book. Dartmouth: International Ocean Colour Coordinating Group, 2022. 924 p.
2. Kopelevich O.V. et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. Vol. 51, N 10–11. P. 1063–1091. doi:10.1016/j.dsr2.2003.10.009
3. Nelson J.R., Guarda S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100. N C5. P. 8715–8732. doi:10.1029/95JC00222
4. Bricaud A. et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1998. Vol. 103. N C13. P. 31033–31044. doi: 10.1029/98JC02712f
5. Bricaud A. et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100. N C7. P. 13321–13332. doi:10.1029/95JC00463
6. Hoepffner N., Sathyendranath S. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton // Marine Ecology-Progress Series. 1991. Vol. 73. P. 11–23.
7. Hooker S.B. et al. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series Vol. 11, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center. 2000. 49 p.
8. Groom S. et al. Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective // Frontiers Marine Science. 2019. Vol. 6:485. doi:10.3389/fmars.2019.00485
9. Kirk J.T.O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 3rd. Cambridge: University Press, 2011. 665 p.
10. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
11. Ferreira A., Garcia V.M.T., Garcia C.A.E. Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and dissolved organic matter at the Patagonia shelf-break in spring and summer // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2009. Vol. 56, N 12. P. 2162–2174. doi:10.1016/j.dsr.2009.08.002
12. Tilstone G.H. et al. High concentrations of mycosporine-like amino acids and colored dissolved organic matter in the sea surface microlayer off the Iberian Peninsula // Limnology and Oceanography. 2010. Vol. 55, N 5. P. 1835–1850. doi:10.4319/lo.2010.55.5.1835
13. Matsuoka A. et al. Tracing the transport of colored dissolved organic matter in water masses of the Southern Beaufort Sea: relationship with hydrographic characteristics // Biogeosciences. 2012. Vol. 9, N 3. P. 925–940. doi:10.5194/bg-9-925-2012
14. Nelson N.B., Siegel D.A. The Global Distribution and Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter // Annual Review of Marine Science. 2013. Vol. 5, N 1. P. 447–476. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100751
15. D'Sa E.J. et al. Absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter of the eastern Bering Sea in the summer with special reference to the influence of a cold pool // Biogeosciences. 2014. Vol. 11, N 12. P. 3225–3244. doi:10.5194/bg-11-3225-2014
16. Churilova T. et al. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea) // Proceedings of SPIE: 23th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2017. Vol. 10466. P. 245. doi:10.1117/12.2288339

17. Efimova T.V. et al. Spectral bio-optical properties of the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) in summer 2020–2021 // Proceedings of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2022. Vol. 12341, N123414U. doi:10.1117/12.2645084
18. Yushmanova A. et al. Inter-Annual Variability of the Seawater Light Absorption in Surface Layer of the Northeastern Black Sea in Connection with Hydrometeorological Factors // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7, N 9. P. 326. doi:10.3390/jmse7090326
19. Pogosyan S.I. et al. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity / Ed. by D.C. Wash // Oceanology. 2009. N49. P. 866–871.
20. Mannino A. et al. Measurement protocol of absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other dissolved materials // IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, 2019.
21. Morel A., Berthon J. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications // Limnology and Oceanography. 1989. Vol. 34, N 8. P. 1545–1562. doi:10.4319/lo.1989.34.8.1545
22. Ведерников В.И. Первичная продукция и хлорофилл в Черном море в летне-осенний период // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ // Сборник научных работ / ред. Виноградов М.Е. и Флинт М.Б. М.: Наука, 1989. С. 65–83.
23. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. Vol. 167, N 2. P. 191–194.
24. Helms J.R. et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnology and Oceanography. 2008. Vol. 53, N. 3. P. 955–969. doi:10.4319/lo.2008.53.3.0955
25. Vähätalo A.V., Wetzel R.G. Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months–years) exposures // Marine Chemistry. 2004. Vol. 89. P. 313–326. doi:10.1016/j.marchem.2004.03.010
26. Чурилова Т.Я. и др. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2016. Т. 9, № 4. С. 367–384.
27. Schwarzw J. et al. Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM) // Oceanologia. 2002. Vol. 44, N 2. P. 209–241.
28. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 2011. 209 с.
29. Finenko Z., Churilova T., Lee R. Dynamics of the Vertical Distributions of Chlorophyll and Phytoplankton Biomass in the Black Sea // Oceanology. 2005. Vol. 45, Suppl. 1. P. 112–126.
30. Geider R.J., MacIntyre H.L., Kana T.M. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient limitation and temperature // Marine Ecology Progress Series. 1997. Vol. 148. P. 187–200. doi:10.3354/meps148187
31. MacIntyre H.L. et al. Photoacclimation of Photosynthesis Irradiance Response Curves and Photosynthetic Pigments in Microalgae and Cyanobacteria // Journal of Phycology. 2002. Vol. 38, N1. P. 17–38. doi:10.0000/135184797337543
32. Babin M. et al. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1996. Vol. 43, N 8. P. 1241–1272. doi:10.1016/0967-0637(96)00058-1
33. Финенко З.З. и др. Действие света, температуры и биогенных элементов на отношение углерод фитопланктона: хлорофилл а // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2, № 2. С. 40–64.
34. Falkowski P.G., Owens T.G. Light — Shade Adaptation: Two Strategies In Marine Phytoplankton // Plant Physiology. 1980. Vol. 66. N 4. P. 592–595. doi:10.1104/pp.66.4.592
35. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морской экологический журнал. 2005. Т. 4, № 1. С. 15–45.
36. Churilova T. et al. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea // European Journal of Remote Sensing. 2019. Vol. 52. P. 123–136. doi:10.1080/22797254.2018.1533389
37. Twardowski M.S., Donaghay P.L. Photobleaching of aquatic dissolved materials: Absorption removal, spectral alteration, and their interrelationship // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2002. Vol. 107, N C8. doi:10.1029/1999JC000281
38. Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryaviy A.A., Churilova T.Y., Krivenko O.V. Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on Ocean Color data // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 2015. P. 96800T.

39. Nelson N.B., Siegel D.A. Chromophoric DOM in the Open Ocean // *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Elsevier. 2002. P. 547–578.
40. Churilova T. et al. Parameterization of Light Absorption of Phytoplankton, Non-Algal Particles and Coloured Dissolved Organic Matter in the Atlantic Region of the Southern Ocean (Austral Summer of 2020) // *Remote Sensing. Seawater Bio-Optical Characteristics from Satellite Ocean Color Data II*, 2023. Vol. 15, N 3. P. 634. doi:10.3390/rs15030634
41. Efimova T. et al. Light Absorption by Optically Active Components in the Arctic Region (August 2020) and the Possibility of Application to Satellite Products for Water Quality Assessment // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, N 17. P. 4346.
42. Matsuoka A. et al. Seasonal variability in the light absorption properties of western Arctic waters: Parameterization of the individual components of absorption for ocean color applications // *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2011. Vol. 116, N2. doi:10.1029/2009JC005594
43. Ferreira A., Ciotti Á.M., Garcia C.A.E. Bio-optical characterization of the northern Antarctic Peninsula waters: Absorption budget and insights on particulate backscattering // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. Vol. 149. P. 138–149. doi:10.1016/j.dsr2.2017.09.007
44. Bricaud A. et al. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters // *Journal of Geophysical Research*. 2010. Vol. 115, N C8. P. C08009. doi:10.1029/2009JC005517
45. Babin M., Stramski D., Ferrari G.M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe // *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2003. Vol. 108, N C7. doi:10.1029/2001JC000882
46. Gonçalves-Araujo R., Röttgers R., Haraguchi L., Brandini F.P. Hydrography-Driven Variability of Optically Active Constituents of Water in the South Brazilian Bight: Biogeochemical Implications // *Frontiers Marine Science*. 2019. Vol. 6. doi:10.3389/fmars.2019.00716
47. Carder K.L., Steward R. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll // *Limnology and Oceanography*. 1989. Vol. 34. P. 68–81. doi:10.4319/lo.1989.34.1.0068
48. Vantrepotte V. et al. CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, N 1. P. 33. doi:10.1364/OE.23.000033
49. Danhiez F.P. et al. Optical properties of chromophoric dissolved organic matter during a phytoplankton bloom. Implication for DOC estimates from CDOM absorption // *Limnology and Oceanography*. 2017. Vol. 62, N 4. P. 1409–1425. doi:10.1002/lno.10507
50. Чурилова Т.Я. и др. Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 73–83. doi:10.59887/fpg/exlp-9vtp-phu8

References

1. Mobley C.D. The Oceanic Optics Book. Dartmouth: International Ocean Colour Coordinating Group, 2022. 924 p.
2. Kopelevich O.V. et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004;51(10–11):1063–1091. doi:10.1016/j.dsr2.2003.10.009
3. Nelson J.R., Guarda S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100(C5):8715–8732. doi:10.1029/95JC00222
4. Bricaud A. et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998;103(C13):31033–31044. doi:10.1029/98JC02712f
5. Bricaud A. et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100(C7):13321–13332. doi:10.1029/95JC00463
6. Hoepffner N., Sathyendranath S. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Marine Ecology-Progress Series*. 1991;73:11–23.
7. Hooker S.B. et al. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series V. 11, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 49 p.
8. Groom S. et al. Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective. *Frontiers Marine Science*. 2019;6:485. doi:10.3389/fmars.2019.00485
9. Kirk J.T.O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 3rd. Cambridge: University Press, 2011. 665 p.
10. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
11. Ferreira A., Garcia V.M.T., Garcia C.A.E. Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and dissolved organic matter at the Patagonia shelf-break in spring and summer. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2009;56(12):2162–2174. doi:10.1016/j.dsr.2009.08.002

12. Tilstone G.H. et al. High concentrations of mycosporine-like amino acids and colored dissolved organic matter in the sea surface microlayer off the Iberian Peninsula. *Limnology and Oceanography*. 2010;55(5):1835–1850. doi:10.4319/lo.2010.55.5.1835
13. Matsuoka A. et al. Tracing the transport of colored dissolved organic matter in water masses of the Southern Beaufort Sea: relationship with hydrographic characteristics. *Biogeosciences*. 2012;9(3):925–940. doi:10.5194/bg-9-925-2012
14. Nelson N.B., Siegel D.A. The Global Distribution and Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter. *Annual Review of Marine Science*. 2013;5(1):447–476. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100751
15. D'Sa E.J. et al. Absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter of the eastern Bering Sea in the summer with special reference to the influence of a cold pool. *Biogeosciences*. 2014;11(12):3225–3244. doi:10.5194/bg-11-3225-2014
16. Churilova T. et al. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea). *Proceedings of SPIE: 23th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017;10466:245. doi:10.1117/12.2288339
17. Efimova T.V. et al. Spectral bio-optical properties of the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) in summer 2020–2021. *Proceedings of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2022;12341:123414U. doi:10.1117/12.2645084
18. Yushmanova A. et al. Inter-Annual Variability of the Seawater Light Absorption in Surface Layer of the Northeastern Black Sea in Connection with Hydrometeorological Factors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019;7(9):326.
19. Pogosyan S.I. et al. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity / Ed. by D.C. Wash. *Oceanology*. 2009;49:866–871.
20. Mannino A. et al. Measurement protocol of absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other dissolved materials. *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*, 2019.
21. Morel A., Berthon J. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnology and Oceanography*. 1989;34(8):545–1562. doi:10.4319/lo.1989.34.8.1545
22. Vedernikov V.I. Primary production and chlorophyll in the Black Sea in summer and fall,” in Структура і Продукційніе Кхарактеристики Планктоніньх Сообшчеств / Ed.by M.E. Vinogradov and M.V. Flint. *Sbornikh Nauchnykh Rabot*. Moscow: Nauka, 1989. 65–83 (in Russian).
23. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochimie und Physiologie der Pflanzen*. 1975;167(2):191–194.
24. Helms J.R. et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*. 2008;53(3):955–969. doi:10.4319/lo.2008.53.3.0955
25. Vähätalo A.V., Wetzel R.G. Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months–years) exposures. *Marine Chemistry*. 2004;89:313–326. doi:10.1016/j.marchem.2004.03.010
26. Churilova T. Ya. et al. Spectral Approach to Assessment of Phytoplankton Photosynthesis Rate in the Black Sea Based on Satellite Information: Methodological Aspects of the Regional Model Development. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2016;9(4):367–384 (in Russian).
27. Schwarzw J. et al. Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM). *Oceanologia*. 2002;44(2):209–241.
28. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Oceanography of the Black Sea. Sevastopol: NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, 2011. 209 p. (in Russian).
29. Finenko Z., Churilova T., Lee R. Dynamics of the Vertical Distributions of Chlorophyll and Phytoplankton Biomass in the Black Sea. *Oceanology*. 2005;45.Suppl. 1:112–126.
30. Geider R.J., MacIntyre H.L., Kana T.M. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient limitation and temperature. *Marine Ecology Progress Series*. 1997;148:187–200. doi:10.3354/meps148187
31. MacIntyre H.L. et al. Photoacclimation of Photosynthesis Irradiance Response Curves and Photosynthetic Pigments in Microalgae and Cyanobacteria. *Journal of Phycology*. 2002;38(1):17–38. doi:10.0000/135184797337543
32. Babin M. et al. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1996;43(8):1241–1272. doi:10.1016/0967-0637(96)00058-1
33. Finenko Z.Z. et al. Phytoplankton carbon to chlorophyll a ratio: response to light, temperature and nutrient limitation. *Marine Ecological Journal*. 2003;2(2):40–64 (in Russian).
34. Falkowski P.G., Owens T.G. Light — Shade Adaptation: Two Strategies In Marine Phytoplankton. *Plant Physiology*. 1980;66(4):592–595. doi:10.1104/pp.66.4.592

35. Finenko Z.Z., Churilova T. Ya., Lee R.I. Vertical distribution of chlorophyll and fluorescence in the Black Sea. *Marine Ecological Journal*. 2005;4(1):15–45 (in Russian).
36. Churilova T. et al. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea. *European Journal of Remote Sensing*. 2019;52:123–136. doi:10.1080/22797254.2018.1533389
37. Twardowski M.S., Donaghay P.L. Photobleaching of aquatic dissolved materials: Absorption removal, spectral alteration, and their interrelationship. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2002;107(C8). doi:10.1029/1999JC000281
38. Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryaviy A.A., Churilova T.Y., Krivenko O.V. Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on Ocean Color data. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, Tomsk, 2015. P. 96800T.
39. Nelson N.B., Siegel D.A. Chromophoric DOM in the Open Ocean. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Elsevier. 2002, 547–578.
40. Churilova T. et al. Parameterization of Light Absorption of Phytoplankton, Non-Algal Particles and Coloured Dissolved Organic Matter in the Atlantic Region of the Southern Ocean (Austral Summer of 2020). *Remote Sensing. Seawater Bio-Optical Characteristics from Satellite Ocean Color Data II*. 2023;15(3):634. doi:10.3390/rs15030634
41. Efimova T. et al. Light Absorption by Optically Active Components in the Arctic Region (August 2020) and the Possibility of Application to Satellite Products for Water Quality Assessment. *Remote Sensing*. 2023;15(17):4346.
42. Matsuoka A. et al. Seasonal variability in the light absorption properties of western Arctic waters: Parameterization of the individual components of absorption for ocean color applications. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2011;116(2). doi:10.1029/2009JC005594
43. Ferreira A., Ciotti Á.M., Garcia C.A.E. Bio-optical characterization of the northern Antarctic Peninsula waters: Absorption budget and insights on particulate backscattering. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018;149:138–149. doi:10.1016/j.dsr2.2017.09.007
44. Bricaud A. et al. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115(C8): C08009. doi:10.1029/2009JC005517
45. Babin M., Stramski D., Ferrari G.M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2003;108(C7). doi:10.1029/2001JC000882
46. Gonçalves-Araújo R., Röttgers R., Haraguchi L., Brandini F.P. Hydrography-Driven Variability of Optically Active Constituents of Water in the South Brazilian Bight: Biogeochemical Implications. *Frontiers Marine Science*. 2019;6. doi:10.3389/fmars.2019.00716
47. Carder K.L., Steward R. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*. 1989;34:68–81. doi:10.4319/lo.1989.34.1.0068
48. Vantrepotte V. et al. CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation. *Optics Express*. 2015;23(1):33. doi:10.1364/OE.23.000033
49. Danhiez F.P. et al. Optical properties of chromophoric dissolved organic matter during a phytoplankton bloom. Implication for DOC estimates from CDOM absorption. *Limnology and Oceanography*. 2017;62(4):1409–1425. doi:10.1002/lno.10507
50. Churilova T. Ya. et al. Spectral Light Absorption Coefficient of Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(3):73–83. doi:10.59887/fpg/ex1p-9vtp-phu8 (in Russian).

Об авторах

- ЧУРИЛОВА Татьяна Яковлевна, ведущий научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0002-0045-7284, WoS ResearcherID: O-8437–2016, Scopus AuthorID: 6603622802, SPIN-код (РИНЦ): 2238-9533, e-mail: tanya.churilova@ibss-ras.ru
- СКОРОХОД Елена Юрьевна, научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, ORCID: 0000-0002-3057-3964, WoS ResearcherID: A-6831–2019, Scopus AuthorID: 57215009764, SPIN-код (РИНЦ): 3314-5775, e-mail: elenaskorokhod@ibss-ras.ru
- ЕФИМОВА Татьяна Владимировна, старший научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0003-3908-4160, WoS ResearcherID: X-1355–2019, Scopus AuthorID: 57194423783, SPIN-код (РИНЦ): 1668-0742, e-mail: tefimova@ibss-ras.ru
- МОИСЕЕВА Наталия Александровна, научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, ORCID: 0000-0003-1356-7981, WoS ResearcherID: AАН-2819–2019, Scopus AuthorID: 57194431032, SPIN-код (РИНЦ): 8946-3315, e-mail: moiseeva@ibss-ras.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-6

УДК 551.463.5

© Е. Н. Корчёмкина^{1*}, В. В. Суслин¹, О. Б. Кудинов¹, И. А. Суторихин^{2,3}, В. В. Кириллов², 2025

¹Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, ул. Капитанская д. 2

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, д. 1

³Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 6

*korchemkina@mhi-ras.ru

КОЭФФИЦИЕНТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ВОД ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В АВГУСТЕ 2023 г. И ЕГО СВЯЗЬ С БИООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Статья поступила в редакцию 16.10.2024, после доработки 24.01.2025, принята в печать 27.01.2025

Аннотация

Согласно наблюдениям последних 20-ти лет, олиготрофное Телецкое озеро (Республика Алтай) подвергается постепенной эвтрофикации, вследствие чего требуется регулярный контроль его экологического состояния. В августе 2023 г. на Телецком озере были проведены комплексные гидрооптические исследования, включавшие в себя измерения спектров коэффициента яркости водной толщи и подводной облученности, а также отбор проб для лабораторного определения концентрации хлорофилла *a*. В основной части участков акватории максимальные значения спектрального коэффициента яркости составляли 0,7–1 %. В областях впадения рек Чулышман, Кокши, Кыга, где присутствует заметный вклад взвешенного вещества, наблюдались увеличения значений спектрального коэффициента яркости до 2,8 %. Была проверена работоспособность полуаналитического биооптического алгоритма расчета концентрации хлорофилла *a* по спектрам коэффициента яркости, адаптированного к условиям внутренних водоемов. Показано завышение результатов расчета по сравнению с измеренными концентрациями хлорофилла *a*, однако при этом между ними наблюдалась значимая корреляция. Кроме того, по спектрам коэффициента яркости и подводной облученности были рассчитаны спектры показателя вертикального ослабления света, хорошо согласующиеся между собой. Основным оптически значимым компонентом воды Телецкого озера является неживая органика, что согласуется с данными непосредственных лабораторных определений. Использованный полуаналитический алгоритм показывает возможности оптических измерений для описания экологического состояния внутренних водоемов и представляет собой первый шаг на пути к спутниковому мониторингу биооптического состояния Телецкого озера.

Ключевые слова: Телецкое озеро, коэффициент яркости водной толщи, хлорофилл *a*, показатель вертикального ослабления облученности, биооптический алгоритм

© Е. Н. Korchemkina^{1*}, V. V. Suslin¹, O. B. Kudinov¹, I. A. Sutorikhin^{2,3}, V. V. Kirillov², 2025

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

²Institute of Water and Ecological Problems SB RAS, 1 Molodezhnaya Str. Barnaul 656038, Russia

³Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 6 Academician M.A. Lavrentiev Ave.,
Novosibirsk 630090, Russia

*korchemkina@mhi-ras.ru

SPECTRAL REFLECTANCE COEFFICIENT OF LAKE TELETSKOYE IN AUGUST 2023 AND ITS RELATIONSHIP WITH BIO-OPTICAL CHARACTERISTICS

Received 16.10.2024, Revised 24.01.2025, Accepted 27.01.2025

Abstract

According to observations over the past 20 years, the oligotrophic Lake Teletskoye (Altai Republic) is undergoing gradual eutrophication, showing the necessity of regular monitoring of its ecological state. In August 2023, multiparametric hydrooptical studies were carried out on Lake Teletskoye, including measurements of the spectral water upwelling radiance reflectance and

Ссылка для цитирования: Корчёмкина Е.Н., Суслин В.В., Кудинов О.Б., Суторихин И.А., Кириллов В.В. Коэффициент спектральной яркости вод Телецкого озера в августе 2023 г. и его связь с биооптическими характеристиками // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 18, № 1. С. 66–77. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-6

For citation: Korchemkina E.N., Suslin V.V., Kudinov O.B., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V. Spectral Reflectance Coefficient of Lake Teletskoye in August 2023 and its Relationship with Bio-Optical Characteristics. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):66–77. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-6

underwater irradiance, as well as sampling for laboratory determination of chlorophyll *a* concentration. In the main part of the lake, spectral maxima of reflectance coefficient were observed to be 0.7–1 %, while in estuary areas of Chulyshman, Kokshi, Kyga rivers where the influence of suspended matter is significant the reflectance reached 2.8 %. The performance of the semi-analytical biooptical algorithm for calculating the chlorophyll *a* concentration from the reflectance spectra, adapted to the conditions of inland waters, was tested. An overestimation of the calculation results compared to the measured chlorophyll *a* concentration was shown, however, a significant correlation was observed between them. In addition, the spectra of the light diffuse attenuation coefficient were calculated from both the reflectance spectra and underwater irradiance, showing good agreement. The main optically significant component of Lake Teletskoye water is nonliving organic matter, which is consistent with the data of direct laboratory determinations. The semi-analytical algorithm shows the possibilities of optical measurements for describing the ecological state of inland water bodies and can be the first step towards bio-optical satellite monitoring of Lake Teletskoye.

Keywords: Lake Teletskoye, spectral reflectance, chlorophyll *a*, diffuse attenuation coefficient, bio-optical algorithm

1. Введение

Телецкое озеро расположено в северо-восточной части Республики Алтай. Протяженность озера 77,8 км, средняя ширина 2,9 км, максимальная ширина составляет 5,2 км. Северная часть водоема вытянута в широтном направлении, южная — в меридиональном. Максимальная глубина озера составляет 323 м, средняя — 181 м. Телецкое озеро — проточное, в него впадают более 70 рек, среди которых крупнейшей является р. Чулышман, обеспечивающая до 70 % от общего притока воды [1]. По гидротермическим характеристикам Телецкое озеро относится к динамическим с двумя периодами полного конвективного перемешивания до максимальных глубин за счет термического бара (май—июль и октябрь—декабрь) [1]. Прозрачность воды в Телецком озере в основном определяется сезонным ходом речного стока, кроме северной кутовой части у пос. Артыбаш, где имеются признаки антропогенного воздействия [2]. Результаты экспедиционных наблюдений с августа 2013 по 2023 гг. за относительной прозрачностью по белому диску на 10 участках акватории Телецкого озера в период летнего прогрева и устойчивой температурной стратификации приведены в [3], где показано, что за отмеченный период произошло снижение средней относительной прозрачности по белому диску с 8,2 до 5,3 м. В работе [4] представлены масштабные исследования, показавшие значительную пространственную изменчивость спектрального показателя ослабления света в различных зонах поверхностного слоя Телецкого озера, в основном определяемую выносом рек Чулышман, Кокши и Кыга (рис. 1). При этом, как было установлено, наибольший вклад в ослабление света в поверхностных водах вносит неживое органическое вещество (растворенная органика, детрит).

Как было показано в работе [4], содержание биогенных элементов изменяется в основном во времени и в горизонтальной плоскости, и в значительно меньшей степени — по вертикали, поэтому развитие фотосинтезирующих организмов определяется только глубиной проникновения солнечного излучения. Анализ данных по вертикальному распределению фитопланктона в пелагиали озера на глубоководных станциях показал, что в любой сезон основная масса фитопланктона сосредоточена в верхней части фотической зоны (0–10 м), различаются только значения его численности и биомассы. Кроме того, выявлена высокая корреляционная зависимость температуры воды и количественных показателей фитопланктона. [5]. Вертикальная изменчивость профилей концентрации хлорофилла *a* наиболее выражена в августе. Характерны 2 типа профилей — с максимумом у поверхности или на глубинах около 1–3 глубины видимости белого диска, причем для августа более характерен последний [6]. Трофический уровень Телецкого озера с оценкой трофности по первичной продукции, прозрачности и содержанию биогенных элементов соответствует ультраолиготрофно-олиготрофному [5, 6]. Однако в настоящее время фиксируется его постепенная эвтрофикация. Очевидно, наблюдаемые изменения трофности озера Телецкое вызваны долговременным увеличением уровня антропогенного загрязнения водной среды, береговых экосистем и биогеоценозов всего бассейна [7]. По исследованиям, проводившимся до 2006 г., среднее значение концентрации хлорофилла *a* для августа составляло в среднем 1,24 мг/м³ [6], согласно данным исследования августа 2022 г. она составляет в поверхностном слое 1,69 мг/м³ [8], согласно измерениям августа 2023 г. — 1,62 мг/м³ (настоящая работа). Таким образом, действительно можно отметить постепенную эвтрофикацию водоема и заключить, что необходим регулярный мониторинг его экологического состояния.

Оптические методы контроля экологического состояния представляются наиболее оперативными и предоставляют широкий охват акватории. Особенно в этом смысле полезны методы дистанционного (спутникового) наблюдения. Существуют модели, позволяющие связать гидрооптические характеристики с биологическими, например, с концентрацией хлорофилла *a*, которая напрямую связана с продуктивностью

водоема [9]. Кроме того, общемировой практикой является создание региональных эмпирических моделей для отдельных внутренних водоемов, морей, районов океана, связывающих биооптические параметры с оптическими характеристиками, измеряемыми контактно или дистанционно [10–12].

Гидрооптические измерения на Телецком озере в основном включали такие параметры как: спектральная подводная облученность, показатель спектрального ослабления света в диапазоне 400–800 нм и относительная прозрачность по белому диску [3, 4, 13, 14]. В данной работе к ним добавлен коэффициент спектральной яркости водной толщи, который представляет собой восходящую яркость водной толщи, нормированную на яркость белого Ламбертовского отражателя. Коэффициент яркости в нескольких спектральных каналах является стандартным продуктом, предоставляемым спутниками оптического дистанционного зондирования Земли [15]. Измеренный спектр коэффициента яркости в видимом диапазоне позволяет рассчитывать содержание хлорофилла *a* в верхней части фотического слоя, оценивать показатель вертикального ослабления света и другие биооптические характеристики [9].

В данной статье анализируются результаты измерений гидрооптических параметров Телецкого озера, выполненных в ходе экспедиционных работ в августе 2023 г. Целью является проверка существующего полуаналитического адаптируемого алгоритма для расчета концентрации хлорофилла *a* по данным контактных измерений коэффициента яркости [16, 17].

2. Данные и методы

В августе 2023 г. на Телецком озере были проведены комплексные гидрооптические исследования с борта теплохода-лаборатории ИВЭП СО РАН, впервые включавшие в себя гиперспектральные измерения коэффициента яркости водной толщи [18]. Кроме того, выполнялся отбор и анализ проб воды для определения концентрации хлорофилла *a*.

2.1. Измерения коэффициента яркости

Для измерений использовался палубный спектрофотометр, разработанный в отделе оптики моря МГИ РАН [19]. С его помощью измерялся спектр восходящей яркости водоема под углом около 30°, нормированной на падающую облученность. Для учета отражения от водной поверхности применялась оригинальная методика: коэффициент яркости 5-сантиметрового слоя воды измерялся в кювете из черного поглощающего стекла и затем вычитался из спектра водной толщи. Методика измерений согласуется с протоколами NASA для подспутниковых измерений [20]. Измерения проводились с борта судна на станциях при различных условиях волнения и облачности, вне тени от берегов, и так, чтобы отражение берегов (гор) не находилось в точке измерения. Время измерения одного спектра составляло 10–15 мин, в течение которых предполагается, что изменения освещенности обусловлены только облачностью, но не суточным ходом. В результате было получено 16 спектров коэффициента яркости в диапазоне длин волн 390–750 нм с разрешением 1 нм и с погрешностью в среднем по спектру 3 %. Вследствие неудовлетворительных погодных условий не удалось получить спектры для всех станций. Станции, где измерялся коэффициент яркости, показаны на карте (рис. 1).

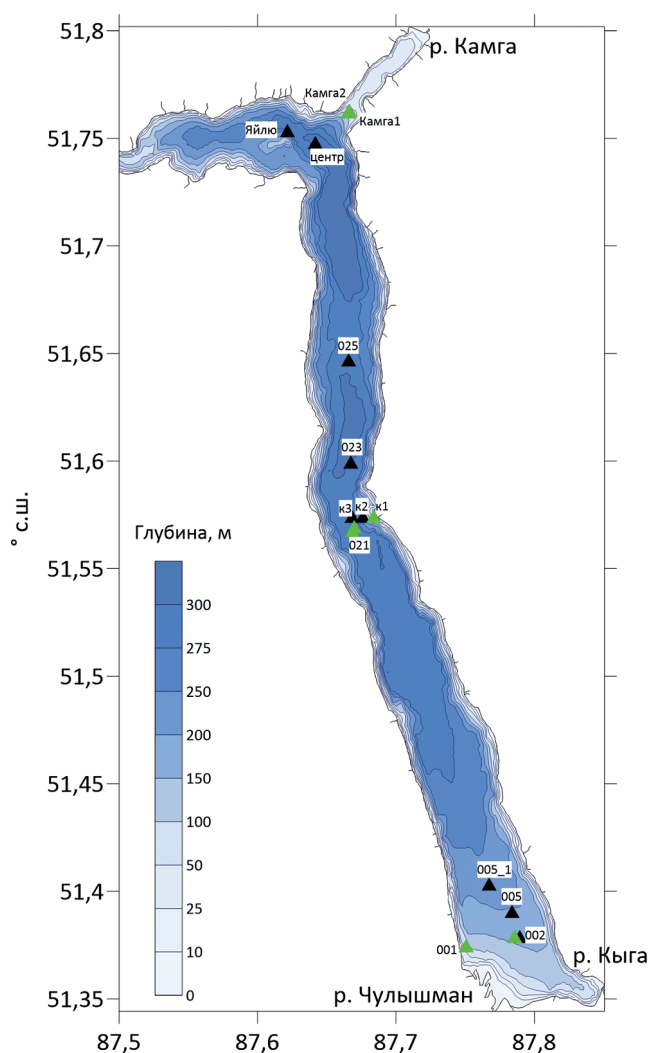


Рис. 1. Станции, где выполнялись оптические измерения. Станции, где одновременно выполнялся отбор проб на хлорофилл *a*, выделены зеленым

Fig. 1. Stations of optical measurements. Stations where simultaneous Chlorophyll *a* samples were taken are highlighted in green

2.2. Определение концентрации хлорофилла *a* в пробах

С целью контроля трофического состояния озера отбирали пробы воды батометром Рутнера с борта теплохода и с резиновой лодки с глубин 0, 5 и 10 м. Концентрацию хлорофилла *a* определяли спектрофотометрированием ацетонового экстракта клеток водорослей фитопланктона, осевших на мембранные фильтры «Владипор» с размером пор 0,8 мкм. Измерения проводили на спектрофотометре ПЭ-5400УФ, концентрацию хлорофилла рассчитывали по общепринятой методике в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90 [21]. В результате получены измерения на 19-ти станциях. В данной работе использованы только значения для глубины 0 м.

2.3. Полуаналитический алгоритм расчета биооптических характеристик по спектру коэффициента яркости

Спектр коэффициента яркости моделируется выражением [16]:

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + Chl \cdot a_{ph}^*(\lambda) + a_{CDM}(440)e^{-S(\lambda-440)}}, \quad (1)$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ — показатель рассеяния назад чистой водой [22]; $a_w(\lambda)$ — показатель поглощения чистой водой [23]; $a_{ph}^*(\lambda)$ — спектр удельного поглощения пигментов фитопланктона (нормированный на концентрацию хлорофилла *a*); $v = 1$ — спектральный наклон рассеяния назад, зависящий от размера частиц, в данном случае предполагается, что взвесь оптически крупная [24]; S — спектральный наклон показателя поглощения света неживой органикой, составлял 0,001–0,017 в зависимости от соотношения детрита и растворенного органического вещества [8]; $b_{bp}(550)$ — показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 550 нм; Chl — концентрация пигментов фитопланктона и $a_{CDM}(440)$ — показатель поглощения неживого органического вещества (растворенного и детрита) на длине волны 440 нм.

Спектр удельного поглощения хлорофилла *a* и его зависимость от концентрации хлорофилла *a* может меняться от водоема к водоему, поэтому для применения алгоритма к новому водному объекту требуется эту зависимость параметризовать на основе натурных измерений концентраций хлорофилла *a* и его поглощения. Поскольку для Телецкого озера такой параметризации пока не существует, в данной работе был использован спектр удельного поглощения из работы [25], полученный для океанических вод с концентрациями хлорофилла *a* от 0,02 до 25 мг/м³. Существуют исследования различных озер [26, 27], среди которых были и олиготрофные, где получена параметризация удельного поглощения хлорофилла *a*, близкая к [25], с отклонениями в пределах 20 % в различных участках спектра. Поэтому в данном исследовании была использована параметризация из работы [25].

Отличительной особенностью данного алгоритма является то, что неизвестные параметры ($b_{bp}(550)$, Chl и $a_{CDM}(440)$) определяются путем одномерной оптимизации в отдельных участках видимого спектра, а не многомерной во всем диапазоне длин волн. За счет подбора участков, где данный параметр оказывает максимальное влияние на коэффициент яркости, алгоритм может быть адаптирован для вод различной трофности. Для определения спектральных участков проводился численный эксперимент, подробно описанный в работе [28]. В нем моделировался спектр коэффициента яркости при различных соотношениях биооптических характеристик, в него добавлялось около 10 % шума, а затем применялся алгоритм для восстановления исходных характеристик в различных участках спектра. В результате были найдены участки спектра, где восстановление происходит наиболее точно. Например, в исходном алгоритме для Черного моря концентрация хлорофилла *a* рассчитывалась в синем максимуме (420–460 нм), а в приложении к Телецкому озеру — в области красного максимума (660–700 нм). В результате неизвестные параметры определяются в итерационной процедуре.

Также нужно отметить, что определяемые параметры являются средневзвешенными по слою первой оптической глубины (глубины видимости белого диска) [27] и не содержат информации о вертикальном распределении реальных примесей в воде.

3. Результаты и обсуждение

Полученные спектры коэффициента яркости приведены на рис. 2, *a*. Многие спектры содержат «шум», обусловленный измерениями при неудовлетворительных погодных условиях (переменная облачность, волнение). В табл. 1 приведены значения спектрального коэффициента яркости в максимуме ($\rho_{\max}$) и длины

волн, где они наблюдаются ($\lambda_{\max}$). Эти величины дают представление об основных компонентах, обуславливающих форму спектра коэффициента яркости. Пространственно все выполненные измерения можно разделить на три группы, для которых характерные спектры приведены на рис. 2, б. Спектры на станции 002, измеренные в зоне выноса реки Чулышман, имеют самые высокие значения, что вызвано большим содержанием в воде взвеси минерального происхождения по сравнению со станцией 021. Станция 021 располагалась в центральной части озера, однако аналогичные по форме спектры были получены на всех станциях меридиональной части озера, за исключением выноса р. Чулышман и Камгинского залива. Спектры на станциях 002 и 021 приблизительно пропорциональны друг другу, что говорит о различии только в содержании взвеси. В Камгинском заливе, находящемся на территории Алтайского государственного биосферного заповедника, на акваторию которого вход водно-моторного транспорта и туристов воспрещен, спектр отличается не только величинами, но и формой (максимум смещен к 590 нм), что может быть обусловлено большим содержанием неживой органики естественного происхождения в небольшой полузамкнутой акватории по сравнению со станциями 002 и 021.

В результате определения концентрации хлорофилла *a* в пробах получены значения $TChl\ a = 1,62 \pm \pm 0,86\ \text{мг/м}^3$ для поверхностного слоя (0 м). Из всех отборов проб только 7 выполнены одновременно с измерениями коэффициента яркости, эти станции выделены цветом в табл. 1.

Спектры коэффициента яркости были обработаны при помощи полуаналитического алгоритма с целью получения биооптических характеристик. В результате рассчитаны концентрация хлорофилла *a* (*Chl*), поглощение неживой органикой на длине волны 440 нм ($a_{CDM}(440)$), рассеяние назад на взвеси $b_{bp}(550)$ и показатель вертикального ослабления света на длине волны 490 нм $K_d(490)$, которые приведены в табл. 1.

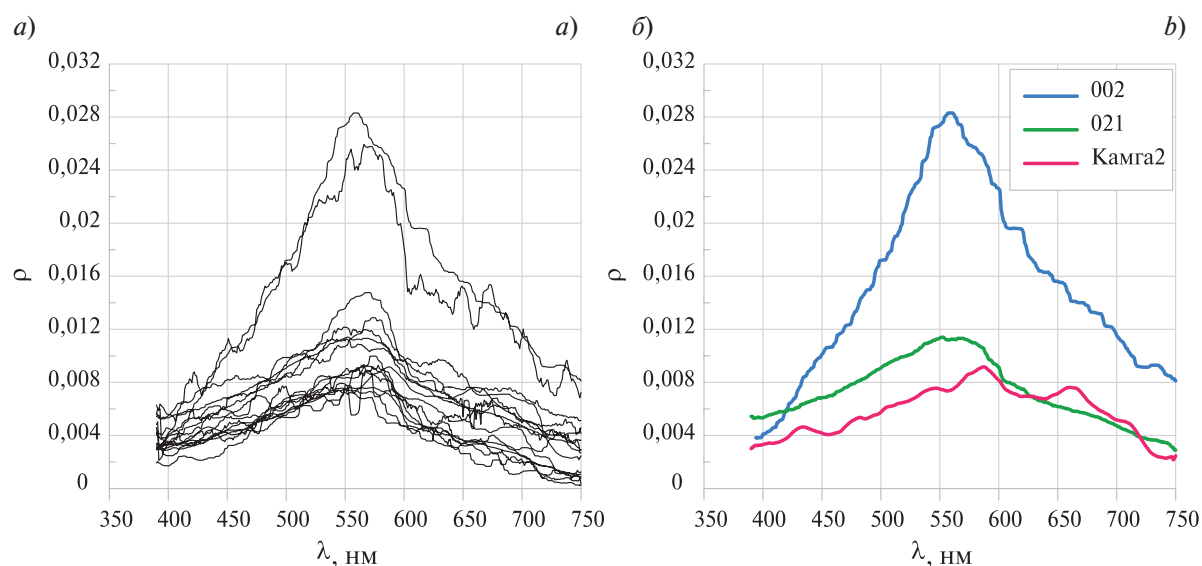


Рис. 2. Спектры коэффициента яркости: а — для всех станций; б — характерные для отдельных районов

Fig. 2. Reflectance spectra obtained for all stations (a); spectra characteristic of individual regions (b)

Таблица 1

Table 1

Результаты проведенных измерений и расчетов
 Measurements and calculations performed

Дата	Время	Станция	$\rho_{\max}$	$\lambda_{\max}$, нм	<i>Chl</i> , мг/м ³	a_{CDM} , м ⁻¹	b_{bp} , м ⁻¹	K_d , м ⁻¹
12.08.2023 Чулышман	9:09	002	0,025	569	1,45	1,03	0,062	0,93
	10:22	002	0,028	559	3,12	1,06	0,058	0,73
13.08.2023 Кыгинский залив	10:03	001	0,011	574	1,24	0,85	0,026	0,95
	12:14	005	0,009	569	2,26	0,64	0,013	0,41
	14:23	005_1	0,015	569	0,11	1,01	0,028	0,56

Окончание табл. 1

Fin table 1

Дата	Время	Станция	$\rho_{\max}$	$\lambda_{\max}$, нм	Chl, мг/м ³	a_{CDM} , м ⁻¹	b_{bp} , м ⁻¹	K_d , м ⁻¹
14.08.2023 Кокши	9:13	021	0,008	576	1,31	1,28	0,031	0,86
	11:27	k1	0,009	569	1,00	0,65	0,021	0,97
	11:50	k2	0,010	573	2,31	1,07	0,019	0,62
	15:59	k3	0,008	552	1,33	0,76	0,017	0,60
15.08.2023 Корбу	9:29	021	0,009	552	2,39	0,68	0,025	0,98
	14:47	023	0,009	566	2,36	0,53	0,012	0,32
	15:58	025	0,009	569	0,12	0,32	0,008	0,27
16.08.2023 Камгинский залив и центр	8:55	центр	0,007	586	0,78	0,45	0,011	0,35
	12:05	Яйлю	0,008	553	3,99	0,61	0,013	0,46
	16:37	Камга1	0,009	562	2,98	1,21	0,038	0,92
	18:52	Камга2	0,009	590	1,56	1,82	0,041	0,96

Примечание. Жирным шрифтом выделены данные для спектров, показанных на рис. 2, б. Цветом выделены станции, для которых имеются одновременные измерения коэффициента яркости и концентрации хлорофилла *a*. Длины волн для параметров: a_{CDM} на 440 нм, b_{bp} на 550 нм, K_d на 490 нм.

Note. The data for the spectra in Fig. 2b are shown in bold. The stations for which there are simultaneous measurements of the reflectance and Chlorophyll *a* concentrations are shown in color. Wavelengths: a_{CDM} at 440 nm, b_{bp} at 550 nm, K_d at 490 nm.

Рассчитанные концентрации хлорофилла *a* были сопоставлены с определенными в пробах (рис. 3). Видно, что, несмотря на заметную корреляцию ($R^2 = 0,72$, $p < 0,05$), расчетные концентрации завышены по сравнению с натурными в среднем на 30 %. Это говорит о неверном выборе входных параметров полуаналитического алгоритма (спектр удельного поглощения хлорофилла, S и ν), для уточнения которых потребуются дополнительные исследования, однако даже в текущем состоянии алгоритм дает возможность качественно оценивать содержание хлорофилла *a*.

Полученные значения поглощения неживой органикой на длине волны 440 нм составляют $0,87 \pm \pm 0,37 \text{ м}^{-1}$, для сравнения в августе 2022 г. были получены значения около $0,65 \text{ м}^{-1}$, хотя в 2023 г. не повторялись измерения на всех станциях 2022 г. [8]. К сожалению, отсутствуют результаты непосредственных измерений рассеяния назад на взвеси, с которыми можно сделать сопоставление. Можно только заключить, что, как и предполагалось, в районе выноса р. Чулышман и в Камгинском заливе значения рассеяния назад значительно выше, чем на остальной исследованной акватории.

Спектры $K_d(\lambda)$ рассчитывались по найденным первичным гидрооптическим характеристикам:

$$K_d(\lambda) = (a(\lambda) + b_b(\lambda)) / \cos \theta_s, \quad (2)$$

где $a(\lambda)$ — суммарное поглощение, $b_b(\lambda)$ — суммарное рассеяние назад, θ_s — высота солнца, средний косинус тела диффузной облученности считался равным $\cos \theta_s$. Считается, что изменения K_d , обусловленные изменением соотношения прямого и диффузного света, не превышают 10–15 % [29]. Полученные спектры сравнивались с результатами расчетов по натурным измерениям профилей подводной спектральной облученности сверху [18]. Получены близкие значения в диапазоне длин волн 450–600 нм (рис. 4). На длинах волн менее 450 наблюдается, во-первых, больший разброс значений K_d , соответствующий изменчивости коэффициента яркости, во-вторых, в некоторых случаях K_d , рассчитанные по профилям облученности, существенно завышены. Это можно в некоторой степени объяснить погрешностями измерений вследствие волнения и неравномерной освещенности.

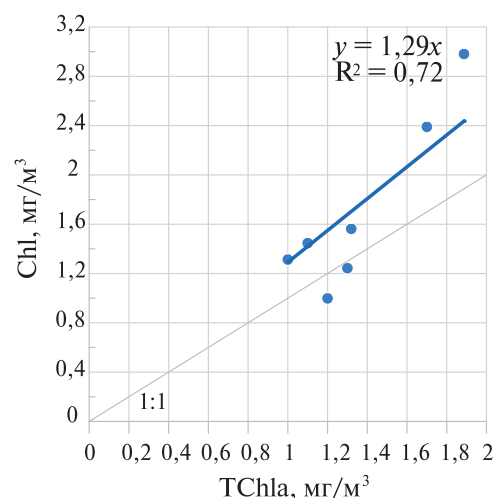


Рис. 3. Сравнение расчетных и натурных концентраций хлорофилла *a*

Fig. 3. Comparison of calculated and *in situ* chlorophyll *a* concentrations

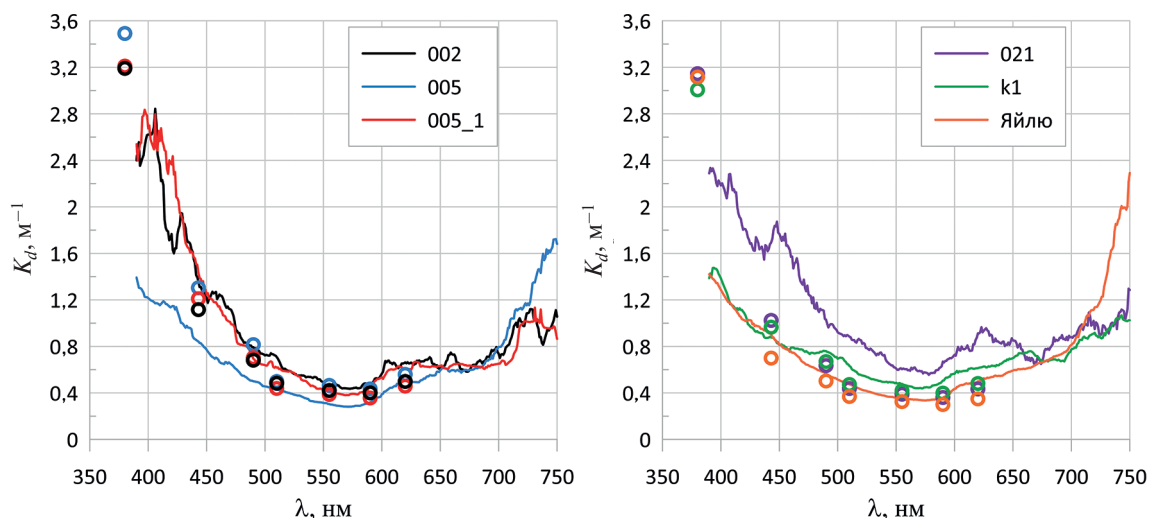


Рис. 4. Спектры K_d , рассчитанные по измерениям коэффициента яркости (сплошная линия) и по измерениям профилей спектральной облученности (кружки)

Fig. 4. K_d spectra calculated from reflectance measurements (solid line) and spectral irradiance profile measurements (circles)

Поскольку показатель вертикального ослабления зависит от суммы поглощения и рассеяния назад, то рассчитанные значения $b_{bp}(550)$, Chl и $a_{CDM}(440)$ позволяют оценить спектральный вклад этих оптически активных компонентов в K_d . В табл. 2 представлены процентные значения этих вкладов, осредненные по всем измерениям. Кроме того, на рис. 5 показаны полные спектральные вклады всех компонентов для отдельных станций. Неживая органика доминирует среди всех оптически активных компонентов во всем спектральном диапазоне. Вклад поглощения пигментов фитопланктона имеет два максимума, причем если максимум на 490 нм составляет приблизительно 7 % от общего поглощения примесями (пигменты и неживая органика), то максимум на 680 нм — уже 25 %. Именно на этом различии вкладов поглощения хлорофилла-а основана модификация биооптического алгоритма для внутренних водоемов. Вклад рассеяния назад на взвеси минимален и меняется только вследствие спектрального изменения K_d .

Таблица 2

Table 2

**Вклады оптически значимых компонентов в показатель вертикального ослабления
(среднее значение $\pm$ среднеквадратичное отклонение)**

Contributions of optically significant components to the diffuse attenuation (mean value $\pm$ standard deviation)

Длина волны, нм	K_d , м ⁻¹	Вклады, %		
		Хлорофилл <i>a</i>	Взвесь	Неживая органика
400	1,89 $\pm$ 0,88	2,3 $\pm$ 1,6	1,9 $\pm$ 0,6	73 $\pm$ 12
440	1,18 $\pm$ 0,48	5,0 $\pm$ 3,0	2,8 $\pm$ 1,1	76 $\pm$ 10
490	0,71 $\pm$ 0,28	5,4 $\pm$ 3,5	4,1 $\pm$ 1,8	73 $\pm$ 8
550	0,44 $\pm$ 0,16	3,0 $\pm$ 2,3	5,9 $\pm$ 3,0	63 $\pm$ 14
680	0,66 $\pm$ 0,10	4,2 $\pm$ 2,9	3,3 $\pm$ 2,1	13 $\pm$ 9

На рис. 5 виден более заметный по сравнению с остальными станциями вклад рассеяния назад на взвеси на станции 002, которая находится в зоне выноса р. Чулышман, а также наибольшие по всем измерениям значения поглощения неживой органикой в Камгинском заливе. Кроме того, можно отметить сходство оптических свойств на станциях 021 и Яйлю, аналогичные им величины и распределения вкладов наблюдаются на всех станциях меридиональной части озера.

4. Заключение

В 2023 г. впервые проведены натурные измерения спектрального коэффициента яркости водной толщи на Телецком озере. Полученные значения позволяют наблюдать пространственную изменчивость оп-

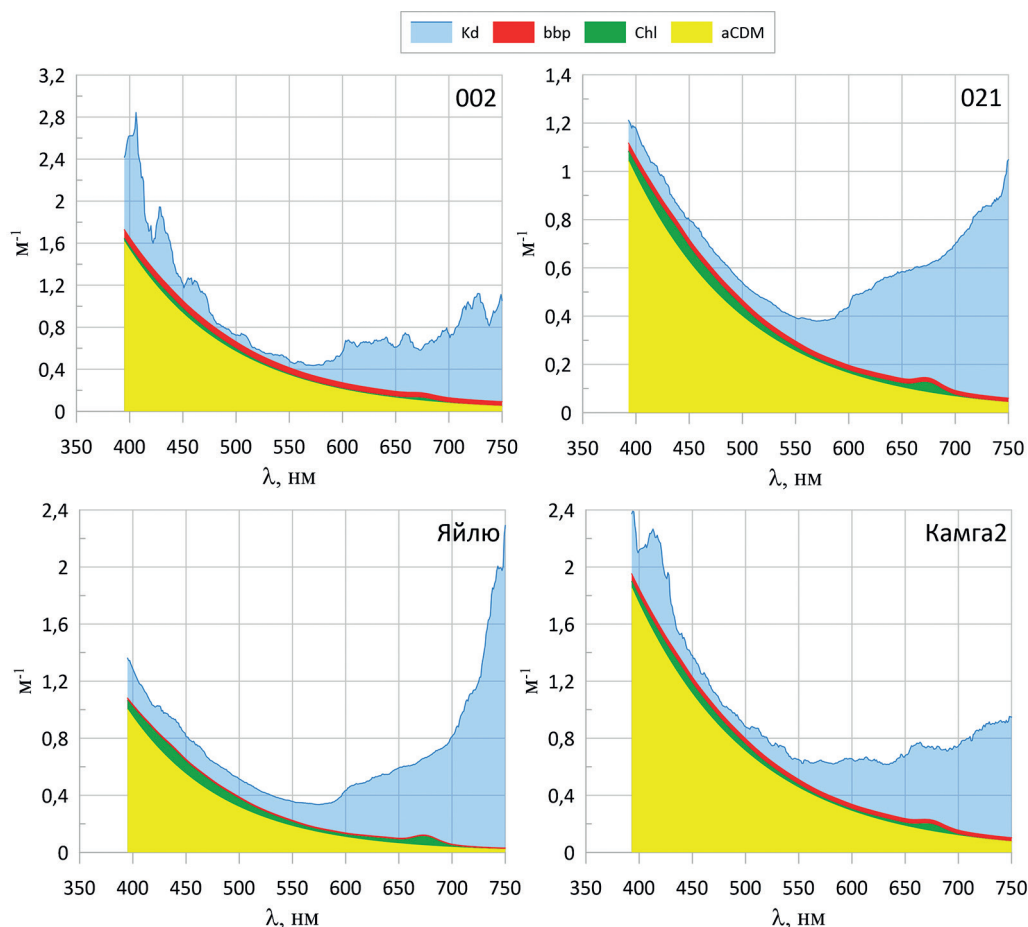


Рис. 5. Спектральные вклады оптически значимых компонентов в показатель вертикального ослабления для нескольких станций

Fig. 5. Spectral contributions of optically significant components into the diffuse attenuation for several stations

тических свойств воды: в областях, где присутствует заметный вклад взвешенного вещества в рассеяние, наблюдались значения коэффициента яркости до 2,8 %, тогда как на основной части акватории максимальные значения составляли 0,7–1 %. Применение полуаналитического алгоритма, адаптированного для внутренних вод, показало удовлетворительную оценку содержания хлорофилла *a* в воде. Для более точной настройки алгоритма требуются дальнейшие натурные исследования. Кроме того, были оценены поглощение неживой органикой и показатель вертикального ослабления света, которые также отражают изменчивость оптических свойств исследуемого водоема.

Предварительный анализ показывает, что основным оптически значимым компонентом воды Телецкого озера является неживая органика, что согласуется с данными непосредственных лабораторных определений [3, 8]. Поглощение неживой органикой испытывает значительную изменчивость, около 50 %, однако вклад ее в показатель вертикального ослабления, напротив, варьирует слабо, особенно в коротковолновой части спектра. Вынос реки Чулышман содержит дополнительно большое количество взвешенного вещества, которое обуславливает рост величин коэффициента яркости. В Камгинском заливе вклад неживой органики выше, чем в остальной части исследованной акватории, что показывает отличающаяся форма спектров коэффициента яркости. Основная часть Телецкого озера, с учетом довольно редкой сетки станций, достаточно однородна по своим оптическим свойствам.

Таким образом, в работе показаны возможности оптических измерений для описания экологического состояния озера. Использованный полуаналитический алгоритм является первым шагом на пути к спутниковому мониторингу биооптического состояния Телецкого озера (комплекса концентраций и поглощения пигментов и неживой органики, оптических характеристик и размерного состава взвеси и т. д.).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0012, ФГБУН ИВЭП СО РАН № 0306-2021-0001, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» и договоров с администрацией ФГБУ «Алтайский государственный природный биосферный заповедник». В экспедиционных работах использовалось научное оборудование ЦКП «Научно-исследовательские суда ИВЭП СО РАН».

Funding

The work was carried out under the state assignments of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation of the FSBSI FRC MHI No. FNNN-2024-0012, the FSBSI IWEP SB RAS No. 0306-2021-0001, the FSBSI «Federal Research Center for Information and Computational Technologies» and agreements with the administration of the Federal State Budgetary Institution “Altai State Nature Reserve”. The scientific equipment of the Collective Use Center “Research Vessels of the IWEP SB RAS” was used in the expedition work.

Литература

1. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л., 1978. 143 с.
2. Робертус Ю.В., Кивацкая А.В., Любимов Р.В. Экологическое состояние воды Телецкого озера в XXI веке // Полевые исследования в Алтайском государственном биосферном заповеднике. 2021. № 3. С. 182–189. doi:10.52245/26867109_2021_12_3_182
3. Суторихин И.А., Кириллов В.В., Коломейцев А.А., Литвиненко С.А. Относительная прозрачность участков акватории Телецкого озера с 2014 по 2023 годы // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2024. № 6. С. 168–172.
4. Суторихин И.А., Коломейцев А.А., Литвиненко С.А. Гидрооптические параметры воды Телецкого озера в период устойчивой летней и зимней температурной стратификации // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 2. С. 35–42. doi:10.7868/S2073667320020045
5. Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера (Алтай, Россия): особенности развития и многолетней динамики // Экология. 2018. № 2. С. 146–151. doi:10.7868/S0367059718020087
6. Кирилова Т.В. Пигментные характеристики фитопланктона Телецкого озера: специальность 03.00.16: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Красноярск, 2006. 24 с.
7. Кудерина Т.М., Суслова С.Б., Грабенко Е.А. и др. Экологическое состояние Телецкого озера при современных изменениях окружающей среды // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2019. № 1. С. 86–91.
8. Moiseeva N.A., Churilova T. Ya., Efimova T.V., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Skorokhod E. Yu. Spectral bio-optical properties of Lake Teletskoye in summer // Proc. SPIE12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 17 Oct 2023, 1278049. doi:10.1117/12.2690958
9. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters / Ed. By Sathyendranath S. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada, 2000. 140 p.
10. Скороход Е.Ю., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Суслин В.В. Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным MODIS и VIIRS // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 233–246. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-233-246
11. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, N 10. 1215. doi:10.3390/rs11101215
12. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, N 1. 64. doi:10.3390/rs11010064
13. Суторихин И.А., Фроленков И.М., Литвиненко С.А., Соловьев В.А. Спектральная подводная освещенность пресноводных водоемов на разных глубинах // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 10, С. 861–865. doi:10.15372/AOO20231011
14. Суторихин И.А., Кривобоков Д.Е., Соловьев В.А., Каменев А.Р. Способ и устройство измерения распределения спектральной солнечной освещенности в фотическом слое водоемов. Патент РФ на изобретение № 2817043. Дата государственной регистрации 09 апреля 2024 г.
15. Gordon H.R. Physical Principles of Ocean Color Remote Sensing. University of Miami, 2019. 995 p. doi:10.33596/ppocrs-19

16. Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчёмкина Е.Н., Мартынов О.В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
17. Korchemkina E., Deryagin D., Pavlova M. et al. Advantage of Regional Algorithms for the Chlorophyll-a Concentration Retrieval from In Situ Optical Measurements in the Kara Sea // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, N11. P. 1587. doi:10.3390/jmse10111587
18. Суслин В.В., Кудинов О.Б., Корчёмкина Е.Н., Латушкин А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Мартынов О.В. Спектральные свойства вертикального распределения горизонтальной облученности в Телецком озере: август 2023 года // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]: Материалы XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. URL: https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/30/ru/abstr_16211.pdf (дата обращения: ...)
19. Ли М.Е., Мартынов О.В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. № 1. С. 163–173.
20. Protocols for Satellite Ocean Colour Data Validation: In Situ Optical Radiometry / Ed. by Zibordi G., Voss K.J., Johnson B.C., Mueller J.L. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 3.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. 2019. 67 p. doi:10.25607/OBP-691
21. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. ИПК. Издательство стандартов. Москва. 12 с.
22. Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water // Optical Aspects of Oceanography / Ed. by N.G. Jerlov, E.S. Nielson. New York: Academic Press, 1974. P. 1–24.
23. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // Applied Optics. 1981. Vol. 20, № 2. P. 177–184. doi:10.1364/AO.20.000177
24. Конелевич О.В. Светорассеивающие свойства морской воды / Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 167–179.
25. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parametrization // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100. P. 13,321–13,332. doi:10.1029/95JC00463
26. Ylöstalo P., Kallio K., Seppälä J. Absorption properties of in-water constituents and their variation among various lake types in the boreal region // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 148. P. 190–205. doi:10.1016/j.rse.2014.03.023
27. Фицек Д., Мелер Й., Западка Т., Стонь-Эгерт Й. Моделирование коэффициентов поглощения света фитопланктоном в озерах Померании (северная Польша) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 4. С. 54–63.
28. Корчёмкина Е.Н., Моляков А.А. Региональный биооптический алгоритм для Горьковского водохранилища: первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 184–192. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192
29. Оптика океана / Под ред. Мониной А.С. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 371 с.

References

1. Selegey V.V., Selegey T.S. *Lake Teletskoye*. L.; 1978. 143 p. (in Russian).
2. Robertus Yu.V., Kivatskaya A.V., Lyubimov R.V. Ecological status of Lake Teletskoye's water in the 21st century. *Field Studies in the Altai Biosphere Reserve*. 2021;3:182–189. doi:10.52245/26867109_2021_12_3_182 (in Russian).
3. Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Kolomeichev A.A., Litvinenko S.A. Relative transparency of the Teletskoye Lake water over a period from 2014 to 2023. *Field Studies in the Altai Biosphere Reserve*. 2024;6:168–172 (in Russian).
4. Sutorikhin I.A., Kolomeitsev A.A., Litvinenko S.A. Hydro-optical parameters of water in Lake Teletskoye during stable summer and winter temperature stratification. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(2):35–42 (in Russian) <https://doi.org/10.7868/S2073667320020045>
5. Mitrofanova E.Y. Phytoplankton of Lake Teletskoye (Altai, Russia): features of development and long-term dynamics. *Russian Journal of Ecology*. 2018;49(2):180–185. doi:10.1134/S1067413618010101
6. Kirillova T.V. Pigment characteristics of phytoplankton of Lake Teletskoye: specialty 03.00.16: abstract of a dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Krasnoyarsk, 2006. 24 p. (in Russian).
7. Kuderina T.M., Suslova S.B., Grabenko E.A. et al. The ecological situation of Teletskoe Lake to environmental changes. *Field Studies in the Altai Biosphere Reserve*. 2019;1:86–91 (in Russian).
8. Moiseeva N.A., Churilova T. Ya., Efimova T.V., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Skorokhod E. Yu. Spectral bio-optical properties of Lake Teletskoye in summer. *Proc. SPIE12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 17 Oct 2023, 1278049. doi:10.1117/12.2690958

9. Remote Sensing of Ocean Color in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters / Ed. by Sathyendranath S. *Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group*. Dartmouth, Canada, 2000. 140 p.
10. Skorokhod E. Yu., Churilova T. Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Suslin V.V. Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Coastal Waters near Sevastopol: Assessment of MODIS and VIIRS Products Accuracy. *Physical Oceanography*. 2021;28(2):215–227. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-215-227
11. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1215. doi:10.3390/rs11101215
12. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sensing*. 2019;11(1):64. doi:10.3390/rs11010064
13. Sutorikhin I.A., Frolenkov I.M., Litvinenko S.A., Soloviev V.A. Underwater spectral irradiance of freshwater reservoirs. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023;36(10):861–865. doi:10.15372/AOO20231011 (in Russian).
14. Sutorikhin I.A., Krivobokov D.E., Soloviev V.A., Kamenev A.R. Method and device for measuring distribution of spectral solar illumination in photic layer of water bodies. *Russian Federation Patent for Invention No. 2817043*. State registration date April 09, 202415.
15. Gordon H.R. *Physical Principles of Ocean Color Remote Sensing*. University of Miami; 2019. 995 p. doi:10.33596/ppocrs-19
16. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V., 2015. Determination of the Concentration of Seawater Components based on Upwelling Radiation Spectrum. *Physical Oceanography*. 2015;6:15–30. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-15-30
17. Korchemkina E., Deryagin D., Pavlova M. et al. Advantage of Regional Algorithms for the Chlorophyll-a Concentration Retrieval from In Situ Optical Measurements in the Kara Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;10(11):1587. doi:10.3390/jmse10111587
18. Suslin V.V., Kudinov O.B., Korchemkina E.N., Latushkin A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Martynov O.V. Spectral properties of the vertical distribution of horizontal irradiance in Lake Teletskoye: August 2023. *Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proceedings of the XXX International Symposium*. July 1–5, 2024, St. Petersburg. URL: https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/30/ru/abstr_16211.pdf (in Russian).
19. Lee M.E., Martynov O.V. Brightness coefficient sensor for subsatellite measurements of water bio-optical parameters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2000;1:163–173 (in Russian).
20. Protocols for Satellite Ocean Colour Data Validation: In Situ Optical Radiometry / Ed. by Zibordi G., Voss K.J., Johnson B.C., Mueller J.L. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 3.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. 2019. 67 p. doi:10.25607/OBP-691
21. GOST 17.1.4.02-90. Water. Methodology for spectrophotometric determination of chlorophyll a. IPC. Publishing House of Standards. Moscow. 12 p. (in Russian).
22. Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water. In: Jerlov N.G., Nielson E.S. (eds.). *Optical Aspects of Oceanography*. New York: Academic Press; 1974. P. 1–24.
23. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm). *Applied Optics*. 1981;20(2):177–184. doi:10.1364/AO.20.000177
24. Kopelevich O.V. Light-scattering properties of sea water. In: *Ocean Optics*. Vol. 1. Physical optics of the ocean. Moscow: Nauka; 1983. P. 167–179 (in Russian).
25. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parametrization. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100:13321–13332. doi:10.1029/95JC00463
26. Ylöstalo P., Kallio K., Seppälä J. Absorption properties of in-water constituents and their variation among various lake types in the boreal region. *Remote Sensing of Environment*. 2014;148:190–205. doi:10.1016/j.rse.2014.03.023
27. Ficek D., Meler J., Zapadka T., Ston-Egiert J. Modelling the light absorption coefficients of phytoplankton in Pomeranian lakes (northern Poland). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2012;5(4):54–63.
28. Korchemkina E.N., Molkov A.A. Regional bio-optical algorithm for Gorky Reservoir: first results. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018;15(3):184–192. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192 (in Russian).
29. Ocean Optics / Ed. Monin A.S. M.: Nauka; 1983. 371 p. (in Russian).

Об авторах

КОРЧЁМКИНА Елена Николаевна, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-0526-4083, Scopus AuthorID: 23004799100, WoS ResearcherID: I-1595-2015, SPIN-код (РИНЦ): 9973-4657

Коэффициент спектральной яркости вод Телецкого озера в августе 2023 г. и его связь с биооптическими характеристиками
Spectral reflectance coefficient of Lake Teletskoye in august 2023 and its relationship with bio-optical characteristics

СУСЛИН Вячеслав Владимирович, заведующий отделом динамики океана, ведущий научный сотрудник
ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-8627-7603,
Scopus AuthorID: 6602501867, SPIN-код (РИНЦ): 1681-7926, e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru

КУДИНОВ Олег Борисович, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидат технических наук,
SPIN-код (РИНЦ): 2248-7034, e-mail: obk91@mail.ru

СУТОРИХИН Игорь Анатольевич, главный научный сотрудник ИВЭП СО РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-7037-4812, Scopus AuthorID: 12789775100,
WoS ResearcherID: LKO 9395-3018, SPIN-код (РИНЦ): 2990-6901, e-mail: sia@iwep.ru

КИРИЛЛОВ Владимир Викторович, заведующий Лабораторией водной экологии ИВЭП СО РАН, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0001-9626-7153, Scopus AuthorID: 35233910500,
WoS ResearcherID: I-9333-2018, SPIN-код (РИНЦ): 7749-7710, e-mail: vkirillov@iwep.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-7

УДК 551.463.5

© А. А. Мольков^{1–3*}, И. А. Капустин^{1–3}, А. В. Ермошкин^{1,2}, Г. В. Лещев^{1,2}, Д. В. Доброхотова^{1,2}, Е. С. Кольцова¹, Б. В. Коновалов^{1,4}, А. Н. Дроздова^{1,4}, Н. А. Богатов², А. М. Чушнякова^{1,4}, А. Г. Кириллов², 2025

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

³Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36

*molkov@ipfran.ru

БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД СРЕДНЕЙ ВОЛГИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 2023 Г.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024, после доработки 19.07.2024, принята в печать 26.11.2024

Аннотация

Настоящая работа открывает цикл статей, посвященных исследованиям биооптических характеристик волжских вод в контексте создания региональных биооптических моделей, учитывающих трансформацию оптических свойств волжских вод при распространении с севера на юг. В работе представлены результаты натурных измерений, выполненных в 2023 г. на первом из исследуемых участков, а именно в акваториях Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ. Измерения выполнялись с высоким пространственным разрешением — 3 м. На различных пространственных масштабах исследованы распределения и вариации различных гидрооптических и гидрологических характеристик, включая спектры яркости воды и синхронизированные с ними данные о содержании растворенных и взвешенных веществ, определяющих ее цвет (хлорофилл *a*, взвесь), а также сопутствующие данные о температуре воды, электропроводности, солёности, содержании растворенного кислорода, скорости и направлении течения. Оценено влияние различных притоков Волги, в том числе показана сезонная изменчивость биооптических характеристик в областях слияния Волги и Оки, Волги и Камы. Даны кросскорреляционные оценки. Полученные результаты расширяют представление об исследуемой акватории и будут использованы при анализе спутниковых данных высокого пространственного разрешения и разработке биооптических моделей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, внутренние водоемы, средняя Волга, Чебоксарское водохранилище, Куйбышевское водохранилище, биооптические характеристики

© А. А. Molkov^{1–3*}, I. A. Kapustin^{1–3}, A. V. Ermoshkin^{1,2}, G. V. Leshchev^{1,2}, D. V. Dobrokhotova^{1,2}, E. S. Koltsova¹, B. V. Konovalov^{1,4}, A. N. Drozdova^{1,4}, N. A. Bogatov², A. M. Chushnyakova^{1,4}, A. G. Kirillov², 2025

¹N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod 603022, Russia

²A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

³Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

⁴Shirshov Institute of Oceanology of RAS, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

*molkov@ipfran.ru

BIO-OPTICAL PROPERTIES OF THE MIDDLE VOLGA AT 2023

Received 31.01.2024, Revised 19.07.2024, Accepted 26.11.2024

Abstract

The presented paper opens a series of articles devoted to studies of the bio-optical characteristics of the Volga waters in the context of creating regional bio-optical models accounting the transformation of the water optical properties from north to south. The preliminary results of field measurements carried out in 2023 at the middle Volga are presented. Measurements were

Ссылка для цитирования: Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Кольцова Е.С., Коновалов Б.В., Дроздова А.Н., Богатов Н.А., Чушнякова А.М., Кириллов А.Г. Биооптические характеристики вод средней Волги по результатам натурных измерений 2023 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 78–91. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-7

For citation: Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Leshchev G.V., Dobrokhotova D.V., Koltsova E.S., Konovalov B.V., Drozdova A.N., Bogatov N.A., Chushnyakova A.M., Kirillov A.G. Bio-optical Properties of the Middle Volga at 2023. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):78–91. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-7

performed with high spatial resolution — 3 m. The spatial distributions and variations of various hydro-optical and hydrological characteristics, including water brightness spectra and the content of dissolved and suspended substances that determine its color (chlorophyll *a*, suspended solids), data on water temperature, electrical conductivity, salinity, dissolved oxygen content, flow velocity and direction, were investigated at different spatial scales. The influence of different Volga tributaries was assessed, including the seasonal variability of bio-optical characteristics in the areas of the confluence of the Volga and Oka, and the Volga and Kama. Cross-correlation estimates were given. The obtained results expand an actual picture of the studied water area and will be used in the analysis of satellite data and the development of bio-optical models.

Keywords: remote sensing, inland reservoirs, middle Volga, Cheboksary reservoir, Kuibyshev reservoir, bio-optical characteristics

1. Введение

Изучению качества вод пресноводных водоемов посвящено большое число зарубежных научных работ и национальных программ [1–5]. Особое внимание в них уделяется созданию систем дистанционного мониторинга на базе спутниковых данных и ГИС-систем, беспилотных летательных аппаратов, автоматических погружных зондов и флуориметров, лидаров палубного и авиационного базирования, способных предоставлять богатую информацию о качестве водных ресурсов на временных масштабах, близких к реальному времени для изучения трендов и контроля влияния антропогенных и биогенных факторов. При этом в открытых источниках есть множество подтверждений, указывающих на практическую эффективность запущенных программ, в целом, а также на используемые методы и подходы, в частности (см., например, [5–7]).

Похожие государственные программы [8–10] запускались и в России, но их результативность не всегда была очевидна: традиционные измерения на определенном наборе гидрометеорологических постов, осуществляемые надзорными государственными органами, хотя по-прежнему остаются важными элементами таких программ, но уже не отвечают на все имеющиеся запросы лимнологов, климатологов, биологов и др., а передовые научные изыскания и даже самые ценные научные результаты не могут быть оперативно внедрены в текущие системы государственного мониторинга. Наступившая осознанность этой преграды все чаще прослеживается в формулировках новых экологических проектов, требуя оперативного решения. Яркий пример такой преграды — невозможность (на текущий момент) признания спутникового мониторинга в качестве регулярного инструмента для количественных оценок тех или иных процессов, например, экологического состояния внутренних водоемов в силу отсутствия утвержденных методик валидации спутниковых данных.

С появлением и успешным функционированием космических сканеров цвета высокого и среднего пространственного разрешений и с оптимальным набором спектральных каналов, вести мониторинг качества воды и приповерхностных процессов на разных пространственных и временных масштабах стало возможным для водоемов практически любых размеров. Об этом свидетельствуют отчетные документы и научные публикации упомянутых ранее зарубежных программ [11, 12]. Использование этой возможности на водоемах России особенно актуально в связи с неудовлетворительным или даже неизвестным состоянием многих из них, значительной удаленностью или недостижимостью, а также в связи с активной цифровизацией всех отраслей народного хозяйства страны.

В 2023 году стартовал проект Российского научного фонда «Волжские биооптические алгоритмы», посвященный формированию «биооптического портрета» главной водной артерии центральной России — р. Волга на отрезке от Нижнего Новгорода (средняя Волга) до Волгограда (нижняя Волга). Настоящий проект включает два направления исследований: анализ трансформации волжских вод с севера на юг по биооптическим характеристикам и разработку биооптических моделей для космических сканеров цвета высокого и среднего разрешений. В настоящей работе приводятся результаты первого направления, основанные на данных натурных измерений, выполненных в 2023 на первой половине маршрута, проложенного по акватории средней Волги. Аналогичные исследования нижней Волги запланированы на 2024 г.

Важно отметить, что несмотря на то, что исследования на Волге ведутся давно, в литературе (см., например, [13–16]) нет необходимых и достаточных сведений необходимых для решения поставленной задачи. Во-первых, практика лимнологических исследований отличается от океанологических. Во-вторых, необходимость знания гидрооптических характеристик (спектральных показателей поглощения и ослабления, характеристик рассеяния, световых полей над и под водной поверхностью) применительно к спутниковому мониторингу внутренних водоемов возникла относительно недавно. В-третьих, в литературе, как правило, не публикуются координаты станций и время отбора проб воды, в результате чего становится невозможным отобрать те измерения, которые были проведены вблизи момента спутниковой съемки. Однако опубликованные данные все же полезны как справочные применительно к анализу восстановленных характеристик волжской воды по спутниковым данным.

2. Район исследований

Исследуемый район Волги целиком относится к средней Волге и охватывает два водохранилища — Чебоксарское водохранилище (ЧВ) на участке от Нижегородской ГЭС до Чебоксарской ГЭС и Куйбышевское водохранилище (КВ) на участке от Чебоксарской ГЭС до слияния с р. Кама в районе пгт. Камское устье (рис. 1). Этот район хорошо освещен в литературе по целому ряду направлений исследований, например, исследование гидродинамических процессов, эрозии берегов и изменчивости топографии дна, влияния режимов работы ГЭС, особенностей развития и распределения фито и зоопланктона, популяций рыб, донных отложений, антропогенного воздействия и др. Среди параметров, наиболее близких к проблеме спутникового мониторинга качества воды, наиболее обстоятельное описание в литературе имеют закономерности распределения и концентрации хлорофилла *a*, как одного из наиболее важных биооптических параметров [17–19]. Сведения по многим другим параметрам (содержание растворенного вещества, взвеси, цветности, прозрачности, и др.) в рассмотренной литературе фрагментарны (см., например, [20, 21]).

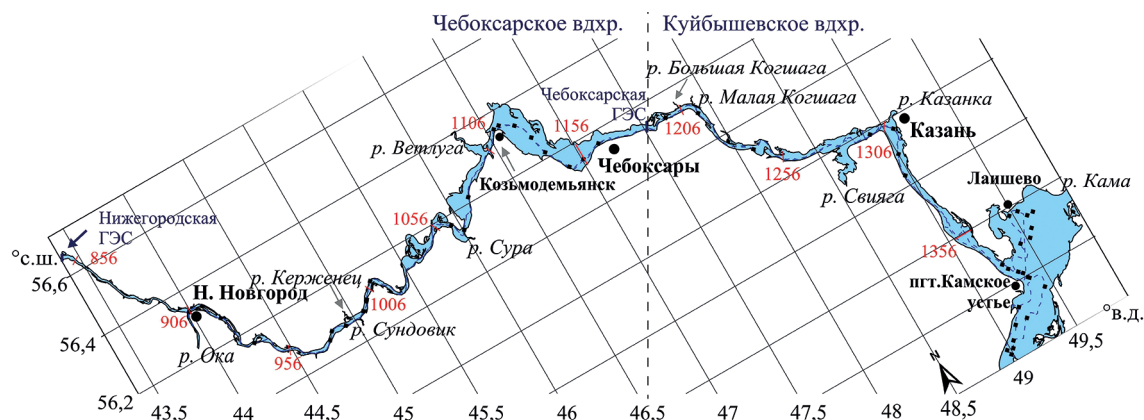


Рис. 1. Схема исследуемого района средней Волги. Цифрами обозначен километраж Волги от истока. Точками отмечены места отбора проб воды для лабораторного анализа

Fig. 1. Scheme of the study region of the middle Volga. The numbers indicate the mileage of the Volga from its source. The dots correspond to water samples

3. Методы и подходы

Натурные измерения в 2023 г. были проведены в ходе двух экспедиций: 17 июля — 08 августа и 09–16 сентября 2023 г. Первая экспедиция выполнена с борта глиссирующей моторной лодки «Волжанка-46», вторая с борта стальной водоизмещающей моторной яхты «Pedro Skiron 35». Схема размещения оборудования представлена на рис. 2.

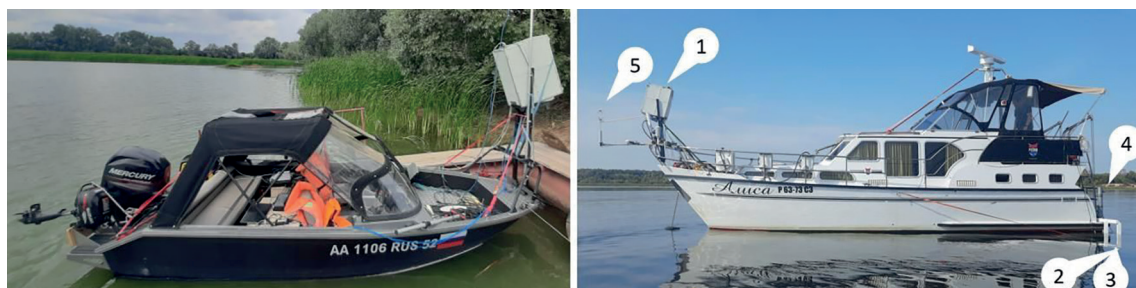


Рис. 2. Схема размещения оборудования во время экспедиций на средней Волге в 2023 году на моторной лодке «Волжанка-46» (слева) и на моторной яхте «Pedro Skiron 35» (справа): 1 — флуоресцентный лидар УФЛ-9, 2 — акустический доплеровский профилограф течений ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz, 3 — СТД-зонд YSI EXO2 с дополнительными датчиками, 4 — проточная система, 5 — метеостанция

Fig. 2. Equipment positions on the motor boat “Volzhanka-46” (left) and on the motor yacht “Pedro Skiron 35” (right) during expeditions on the middle Volga in 2023: 1 — fluorescent lidar UFL-9, 2 — Doppler acoustic current profiler ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz, 3 — CTD sonde YSI EXO2 with additional sensors, 4 — flow system, 5 — weather station

На носовом релинге под углом 10 градусов к вертикали был установлен флуоресцентный лидар УФЛ-9 разработки ИО РАН [22] для зондирования невозмущенного судном верхнего водного слоя и регистрации сигналов флуоресценции хлорофилла *a* и органического вещества (ОВ), а также сигнала обратного рассеяния, коррелирующего с содержанием минеральной взвеси. Погрешность измерений составляет 10 % для взвеси и ОВ и 16 % для хлорофилла *a*. Акустический доплеровский профилограф течений ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz фиксировался в кормовой части судна на внешнем выносном кронштейне на глубине 0,5 м (уровень положения сенсоров) и удалении 0,5 м от борта. Погрешность измерений составляла 0,3 %. Из-за намагниченности корпуса судна направление течений корректировалось по данным внешнего GPS приемника, осуществляющего запись координат непосредственно в файл данных ADCP. Скорость и направление ветра регистрировались анемометром WindMaster Pro с последующим усреднением и пересчетом на скорость и курс судна по GPS. Зонд YSI EXO 2 устанавливался в проточную систему (вертикальная серая труба на рис. 2) таким образом, что сенсоры располагались на высоте 20 см от дна системы. Подача воды с горизонта 0,5 м осуществлялась в проточную систему снизу для исключения накопления и взмучивания осадка, излишки воды самотеком вытекали через верхнюю кромку. Зонд регистрировал температуру воды (°C), электропроводность (мкСм/см), растворенный кислород (мг/л), мутность (FNU), позднее пересчитываемую во взвесь (мг/л), концентрацию хлорофилла *a* (мкг/л), а также флуоресценцию ОВ (RFU), пересчитываемую в показатель поглощения $a(440)$ на длине волны 440 нм (м^{-1}). Погрешность измерений не превосходит 1 % (<https://www.ysi.com/exo2>).

Для пересчета сигналов флуоресценции оптических сенсоров (лидара и зонда) в биооптические характеристики, принятые в оптике океана, на всем маршруте была отобрана 101 проба воды из верхнего слоя толщиной 0–30 см с помощью ведра. Пробы воды фильтровались через фильтры Whatman GF/F 0.7 мкм на борту в тот же день. Фильтры использовались позднее в лаборатории для определения концентраций хлорофилла *a* и взвеси (минеральной и органической частей) по методике [23], фильтрат — для восстановления спектрального показателя поглощения света водой [24].

Все измерения, кроме отбора проб воды, производились во время движения судов: моторная лодка двигалась со скоростью 36 км/ч (10 м/с), моторная яхта — 10–12 км/ч. Измерительная техника работала непрерывно с частотой 1 Гц, что обеспечило получение данных с пространственным разрешением 3–10 м. После экспедиции данные со всех приборов были сведены в единый массив синхронизованных и геопривязанных данных. На его основе построены карты пространственно-временных распределений измеренных параметров и исследованы корреляции между параметрами. Для построения карт использовалось усреднение данных по 200 м (1 мин), для поиска корреляционных связей между измеренными характеристиками — 5 км. Ниже будут представлены данные по концентрации хлорофилла *a*, взвеси и ОВ как с лидара, так с зонда. Это связано с тем, что в начале пути лидар был запущен позднее, поскольку мешала дождливая погода для его корректной работы, в то время как на обратном пути вышла из строя помпа проточной системы (приблизительно в последней трети маршрута от Васильсурска до Нижнего Новгорода).

4. Результаты и обсуждение

4.1. Калибровки

На рис. 3 представлены калибровочные зависимости лидара и зонда для пересчета сигналов флуоресценции в размерные биооптические характеристики воды: хлорофилл *a*, показатель поглощения $a(440)$, взвесь (R^2 — коэффициент детерминации, N — число точек).

4.2. Пространственные распределения характеристик

Пространственное распределение характеристик на глубине полуметра попарно представлено на рис. 4 на основе данных зонда за 09–17 сентября: верхняя карта каждой пары соответствует прямому маршруту вниз по течению, нижняя — обратному маршруту (стрелки поясняют направление движения). Видно, что ключевые биооптические характеристики варьировались в значительных пределах 0,8–45 мкг/л (хлорофилла *a*), 2,8–3,8 мг/л (минеральная взвесь), 1–2,5 м^{-1} (показатель поглощения на длине волны 440 нм, $a(440)$), имея при этом различные пространственные масштабы флуктуаций. Так содержание пигмента на уровне 8–12 мкг/л наблюдалось вдоль всего маршрута, за исключением участка протяженностью 170 км от р. Ока до р. Сура (рис. 4, *a*, верхняя кривая). Поток окской воды с концентрацией пигмента на уровне 45 мкг/л (в створе слияния Оки и Волги, 906-й км), не смешиваясь с волжской, распространялся на 40 км до г. Кстово, ниже которого наблюдалось быстрое смешение потоков до равновесной концентрации 17 мкг/л,

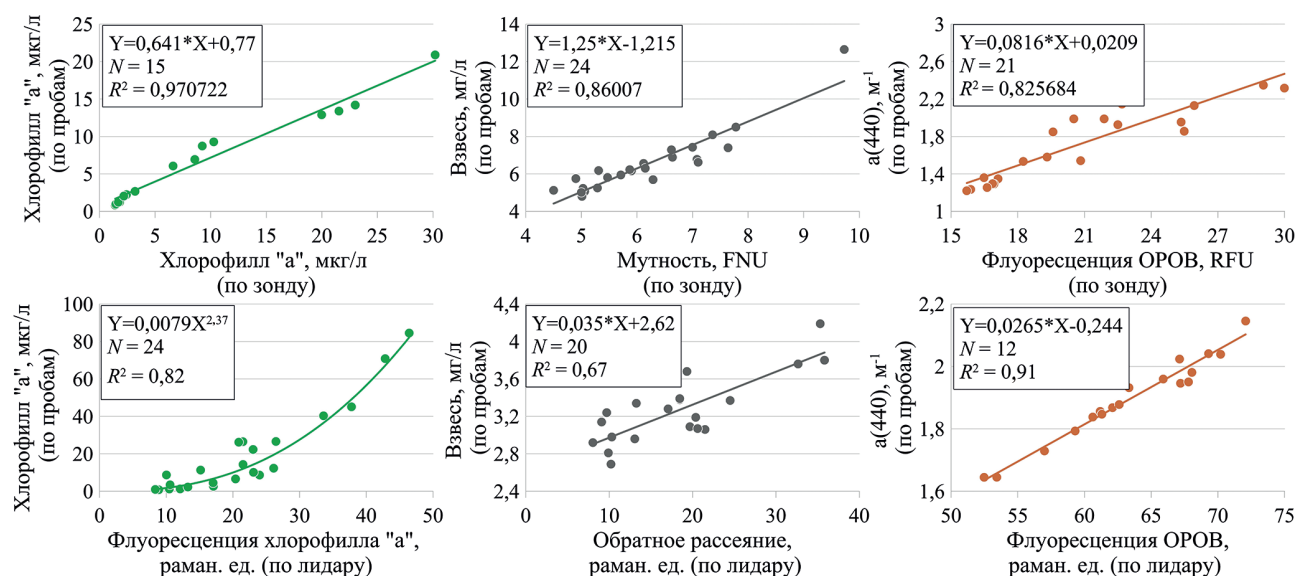


Рис. 3. Результаты калибровки зонда (верхний ряд) и лидара (нижний ряд)

Fig. 3. Calibration curves for YSI sonde (top) and LiDAR (bottom)

сохранявшейся на этом уровне вплоть до начала расширения Волги в районе р. Сура (1068-й км). Здесь концентрация падала до значений, близких к фоновым в начале маршрута — 8 мкг/л и сохранялась на таком уровне последующие 330 км до самого Камского устья (1400-й км). В Каме отмечено самое низкое содержание пигмента — 2–5 мкг/л. Локальное мелкокомасштабное повышение концентрации пигмента до 25–30 мкг/л наблюдалось вследствие нагонного эффекта под правым берегом за 15 км до Чебоксар (1160-й км). Важно отметить, что зарегистрированное пространственное распределение получено в условиях сонаправленного с течением продолжительного сильного северного ветра. В течение последующих 4 дней на обратном маршруте (рис. 4, а, нижняя карта) пространственное распределение пигмента в целом не поменялось, хотя в условиях штилевой ясной погоды приповерхностные скопления фитопланктона в районах с малой проточностью стали более частыми и протяженными (см., например, озерную часть ЧВ ниже г. Козьмодемьянск, участок 1120–1160-й км). Согласно результатам лабораторного анализа проб воды, в отдельных случаях встречались концентрации хлорофилла *a* до 256 мкг/л.

Пространственное распределение взвешенного вещества характеризовалось умеренным постоянством на уровне 5–10 мг/л в районе Нижнего Новгорода выше р. Ока и от р. Ветлуга до р. Кама (рис. 4, б, верхняя карта). При этом наиболее низкие концентрации порядка 5 мг/л зарегистрированы на хорошо проточном участке ниже Чебоксарской ГЭС и на р. Кама выше слияния с Волгой. Области с концентрацией взвеси порядка 10–12 мг/л установлены в условиях ветро-волнового воздействия в районах, подверженных эрозии берегов (крутые глиняные берега выше пгт. Камское устье), на мелководных поймах вследствие взмучивания донных осадков (ниже пгт. Лаишево в озерной части КВ), а также в областях, где проявляется нагонный эффект (например, фитопланктона в низовье озерной части ЧВ). Однако, наиболее заметные возрастания до 20 мг/л наблюдались на обратном пути в областях приповерхностного скопления фитопланктона в условиях штилевой погоды (см. для сравнения нижнюю карту на рис. 4, а). В таких районах согласно результатам лабораторного анализа 51 пробы воды вклад органической компоненты составлял до 45–70 %, при среднем вкладе в 37 % на протяжении всей исследуемой акватории в условиях перемешанного верхнего слоя в ветренную погоду. Концентрация же минеральной взвеси варьировалась в небольших пределах от 2,8 мг/л до 4,5 мг/л (рис. 4, в), при этом наибольшие концентрации зарегистрированы там же, где и скопления фитопланктона у поверхности (см. рис. 4, а и в, нижние карты). Вероятно, это связано с «захватом» мелких минеральных частиц колониальными видами фитопланктона посредством полисахаридной слизи [25].

Пространственное распределение последнего из рассматриваемых биооптических компонентов, а именно показателя поглощения $a(440)$, как индикатора растворенного органического вещества и гуминовых кислот в первую очередь, представлено на рис. 4, г. Видно, что $a(440)$ волжской воды характеризо-

вался стабильным значением $1,5 \text{ м}^{-1}$ до р. Сура и варьировался в небольшом диапазоне $1,7\text{--}2 \text{ м}^{-1}$ ниже нее до слияния с р. Кама. Наименьшие значения $1\text{--}1,2 \text{ м}^{-1}$ зарегистрированы в притоках Ока, Свияга и Кама. Значительно более контрастная картина возникала в условиях ясной штилевой погоды, когда показатель поглощения возрос до $2,5\text{--}3 \text{ м}^{-1}$ в районах скопления фитопланктона у поверхности, что вероятно вызвано продуцированием органического вещества клетками фитопланктона [26]. Надо отметить, что $a(440)$ оказался единственным из биооптических параметров, изменения которого вблизи притоков были регулярны (см. локальные вариации цвета напротив притоков на рис. 4, з).

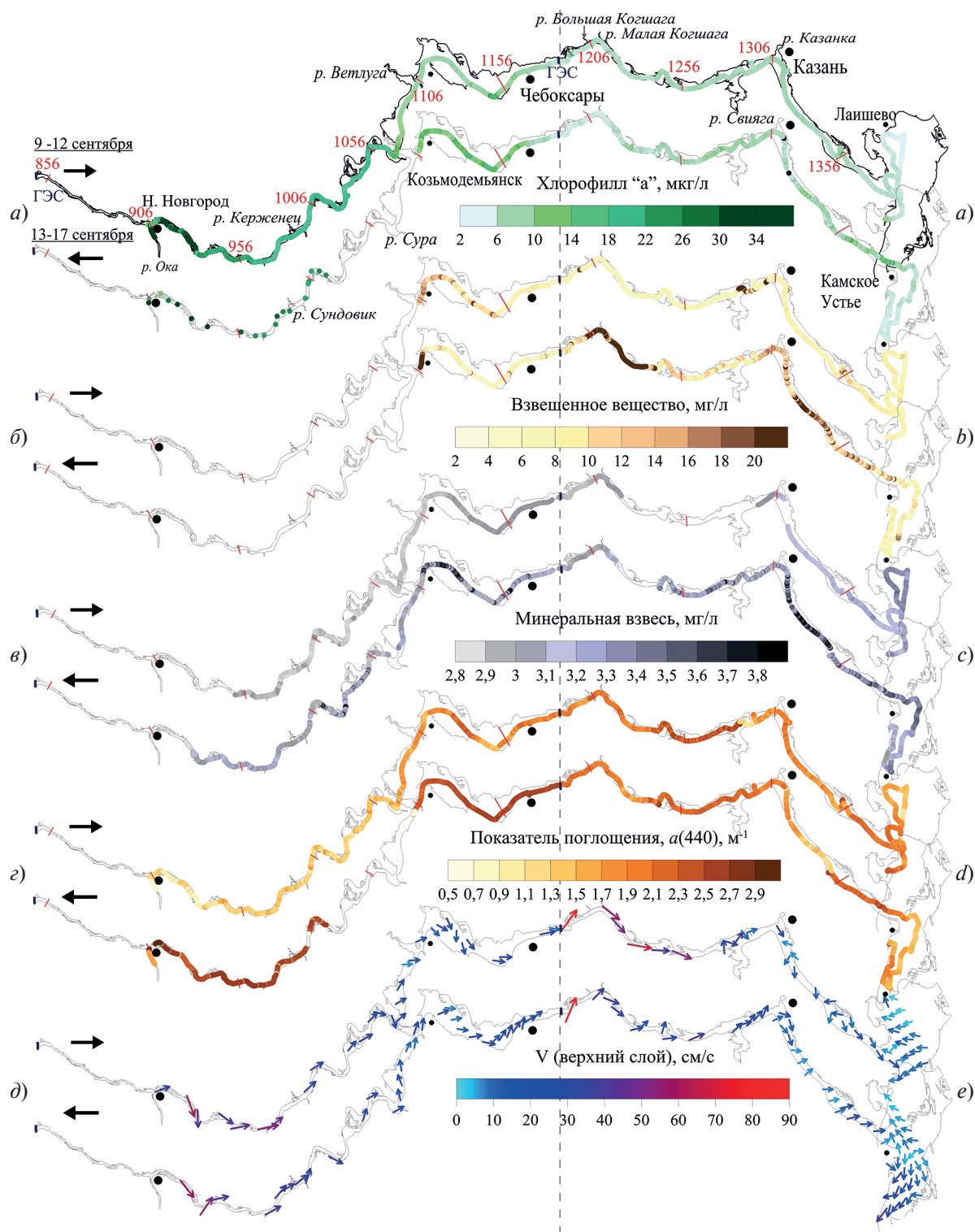


Рис. 4. Окончание на с. 84
Fig. 4. Fin in p. 84

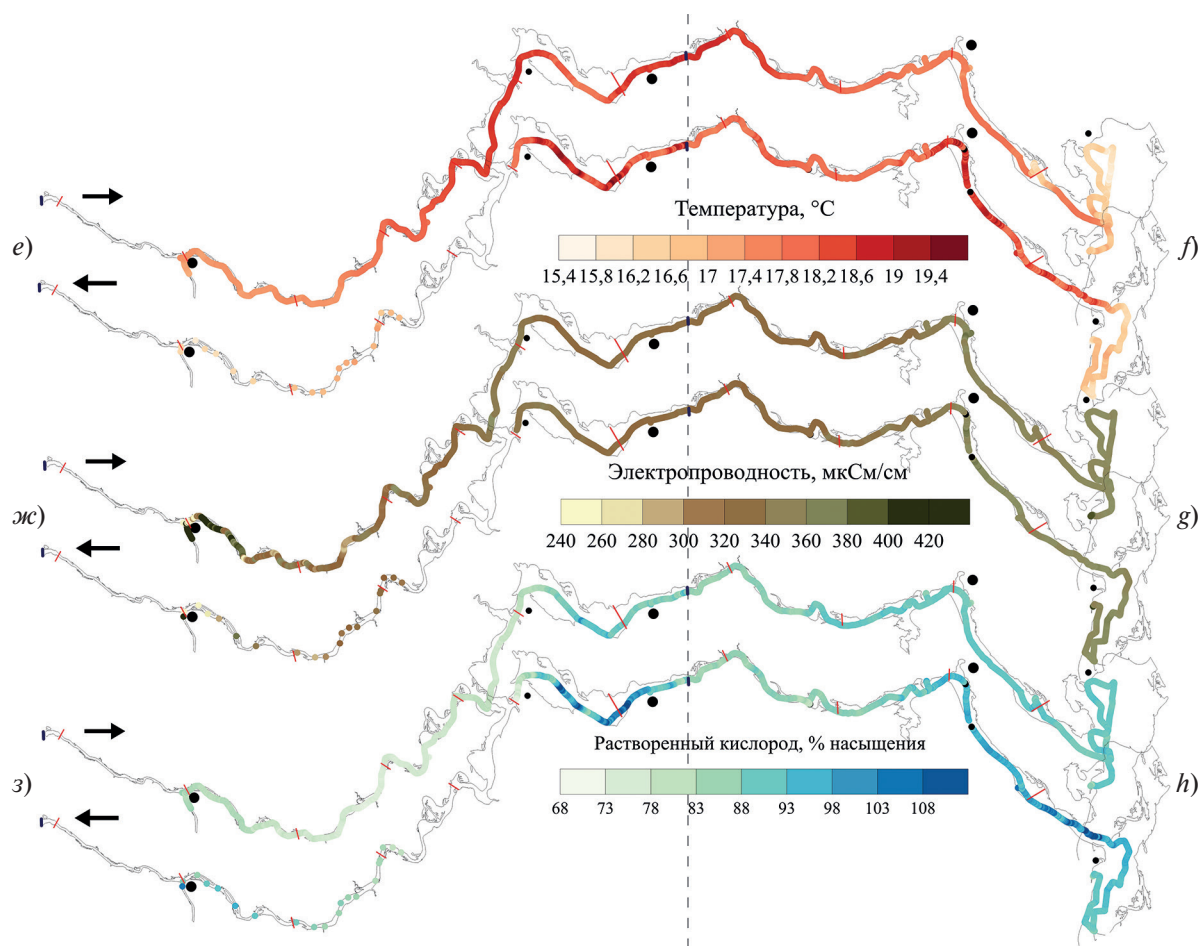


Рис. 4. Пространственное распределение (усреднение 200 м) биооптических характеристик на средней Волге за 09–17 сентября 2023 г.: верхняя кривая каждой пары соответствует движению по течению, нижняя — в обратном направлении (направление движения продублировано стрелками)

Fig. 4. Spatial distribution (averaging 200 m) of biooptical characteristics of the middle Volga at September 09–17, 2023: the upper distribution of each pair corresponds to movement with the Volga current, the bottom distribution — in the opposite direction. The movement direction is duplicated by arrows

В дополнение к биооптическим характеристикам на рис. 4, д-з представлены распределения важных гидрологических характеристик, отчасти проясняющих распределение биооптических. Среди них — течение на глубине 1 м (приповерхностное течение), температура воды, электропроводность и растворенный кислород. Согласно рис. 4, д наибольшая скорость течения в 1 м/с наблюдалась ниже Чебоксарской ГЭС в районе притоков Большая и Малая Кокшага (30 км от ГЭС) (аналогичные данные ниже Нижегородской ГЭС были опубликованы ранее в работе [27]). Ниже скорость потока в речных частях обоих водохранилищ потока падала до 15–30 см/с, а при переходе к озерной части до 5–15 см/с. Общую структуру течений на исследуемом участке акватории можно охарактеризовать как весьма сложную, поэтому регулярных корреляций с распределением биооптических характеристик не установлено, хотя в отдельных районах наблюдались общие закономерности проявления скоплений взвеси и повышенной температуры воды в областях с малой проточностью (озерные части ЧВ и КВ). Кроме того, пространственная структура скорости течения даже на масштабах нескольких дней (при движении с севера на юг и на обратном маршруте) практически не обладала повторяемостью, что может быть обусловлено движением носителя аппаратуры на периодических волнах попуска через ГЭС (при движении от Нижнего Новгорода до Новочебоксарска — Горьковской ГЭС, при движении от Чебоксар до Камского устья — Чебоксарской ГЭС).

Распределение температуры верхнего слоя воды представлено на рис. 4, е. Видно, что в речной части ЧВ температура воды составляла 17 °С, плавно возрастающая до 19 °С на участке от р. Керженец до р. Сура и оставаясь таковой всю озерную часть ЧВ. При этом температура воды сохранялась даже после прохож-

дения Чебоксарской ГЭС, что указывает на относительно однородное распределение температуры по глубине (вероятно, в силу перемешивания слоев под действием продолжительного ветрового воздействия), поскольку сброс воды осуществляется с нижних горизонтов. Двадцатью километрами ниже притоков Большая и Малая Кокшага температура воды резко снизилась на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и оставалась таковой на протяжении последующих 150 км вплоть до Камского устья. Локальный минимум в $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на мелководной пойме по левому берегу перед Камским устьем (напротив пгт. Теньки), вероятно, связан с влиянием холодных притоков, поскольку затекание холодной камской воды ($15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) под левым берегом Волги установлено не было. Ниже, в зоне слияния с холодной камской водой волжский поток быстро остывал до тех же $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые наблюдались в начале маршрута в районе Нижнего Новгорода, при этом камский поток отчетливо прорисовывался левее, что совпадает с его идентификацией по показателю поглощения (см. для сравнения рис. 4, *з*). Следует отметить, что полученные температурные показатели скорее всего не являются типичными для данного периода года, поскольку в сентябре 2023 г. температура воздуха была существенно выше климатической нормы.

Следующий значимый параметр — электропроводность. Из рис. 4, *ж* видно, что в целом наблюдается плавное увеличение минерализации к югу, что согласуется с предшествующими исследованиями (см., например, [28]). Так электропроводность волжской воды в верхней части ЧВ перед Нижним Новгородом составляла 250 мкСм/см, в озерной части ЧВ — 320 мкСм/см, от р. Казанка и ниже по течению, включая Каму — 350 мкСм/см. Сравнение распределений на прямом и обратном маршруте указывает на постоянство распределений независимо от метеоусловий. При этом за счет не больших, но устойчивых вариаций (порядка 5 %) рассматриваемого параметра все же выделяются некоторые притоки (р. Ока, Керженец, Ветлуга), подобно проявлениям по показателю поглощения.

Наконец, на рис. 4, *з* представлено пространственное распределение растворенного в воде кислорода. Несмотря на изменчивость этой характеристики под действием ряда биологических процессов, можно отметить, что на момент съемки содержание растворенного кислорода в волжских водах ЧВ (за исключением участка от Козьмодемьянска до Чебоксар) было в среднем на 20 % меньше, чем в водах КВ (7 мг/л против 9 мг/л). В течение последующих нескольких суток распределение осталось прежним, за исключением локальных мелкомасштабных повышений до 12 мг/л в областях скопления фитопланктона.

4.3. Проявление притоков

Как уже отмечалось выше, некоторые притоки были отличимы по содержанию органического вещества (ОВ) в воде и ее электропроводности. Таблица 1 дает более полное количественное описание проявления притоков на всем протяжении маршрута экспедиции по величине контраста каждой из измеренных характеристик воды. Контраст рассчитывался как отношение значения характеристики в точке, напротив или ниже притока, к значению на 1–10 км выше притока (в зависимости от ширины устья и подпора). Исключение р. Ветлуга и р. Кама. Ветлуга имеет широкое устье, поэтому результат оценки контраста вблизи него сильно варьировался и был исключен из рассмотрения. Что касается р. Кама, то контраст определялся по значениям в двух точках — первая на русле р. Волга у пгт. Камское устье, вторая — на 30 км выше по Каме напротив пгт. Лайшево. Через знак «/» указаны значения на прямом маршруте в условиях перемешанного верхнего слоя под действием сильного ветра и значения на обратном маршруте, зарегистрированные в штилевую ясную погоду. Если за значимые контрасты принять контрасты, отличающиеся более чем на 15 %, то большая часть наиболее крупных притоков оказывается условно различимой. Однако изменение контрастов на прямом и обратном рейсе, связанное с принципиально различными метеоусловиями, указывает на, например, малую надежность использования взвеси и ее производных в качестве маркера притока. Исключение — р. Ока, воды которой в силу узкого устья и значительного расхода воды, соизмеримого с р. Волга ($1300\text{ м}^3/\text{с}$ против $2800\text{ м}^3/\text{с}$ соответственно), уверенно идентифицировались по всем биооптическим характеристикам. В качестве примера на рис. 5, *а* приведено спутниковое изображение слияния рек Волга и Ока, а на рис. 5, *б-г* — распределения хлорофилла, показателя поглощения $a(440)$ и электропроводности для этого района. Следует отметить, что среди прочих характеристик именно электропроводность несмотря на малый (3–5 %), но регулярный контраст оказалась надежным маркером различения вод практически всех притоков. Исключение составили воды в районе Камского устья, где однородная электропроводность наблюдалась во всем районе и даже выше по течению, вплоть до Казани.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчета контраста для характеристик воды, измеренных зондом на глубине 0,5 м, в районе притока и выше него («—» — параметр не определен, н. д. — нет данных)

Results of contrast calculation for water characteristics measured by the sonde at a depth of 0.5 m, in the inflow area and above it («—» means parameter not defined, n. d. is no data)

	Ока	Сундовик	Сура	Ветлуга	Когшага	Свияга	Казанка	Кама
Биооптические характеристики								
Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л	5,75/5,73	1,07/1,01	0,56/5,27	—/—	1,39/1,04	0,93/0,89	1,05/0,87	0,42/1,04
Показатель поглощения, м ⁻¹	0,82/0,54	0,79/1,01	1,16/0,78	—/—	1,15/0,93	0,42/1,02	0,84/0,93	0,7/0,72
Взвешенное вещество, мг/л	0,42/1,49	0,42/1,05	2,95/1,15	—/—	1,13/2,89	5,9/0,36	0,17/0,62	0,55/1,69
Гидрологические характеристики								
Температура воды, °С	0,98/0,99	1/1	1/ н. д.	1/ н. д.	0,97/1	0,98/1,01	1/1,02	0,89/0,96
Растворенный кислород, мг/л	1/1,19	1,03/1	1/ н. д.	1/ н. д.	1,02/1,04	0,97/1,04	1/1	1/0,98
Электропроводность, мкСм/см	2,83/2,47	0,95/0,96	1,1/ н. д.	1/ н. д.	1/0,95	1,03/0,98	1,05/1,02	0,99/1,02

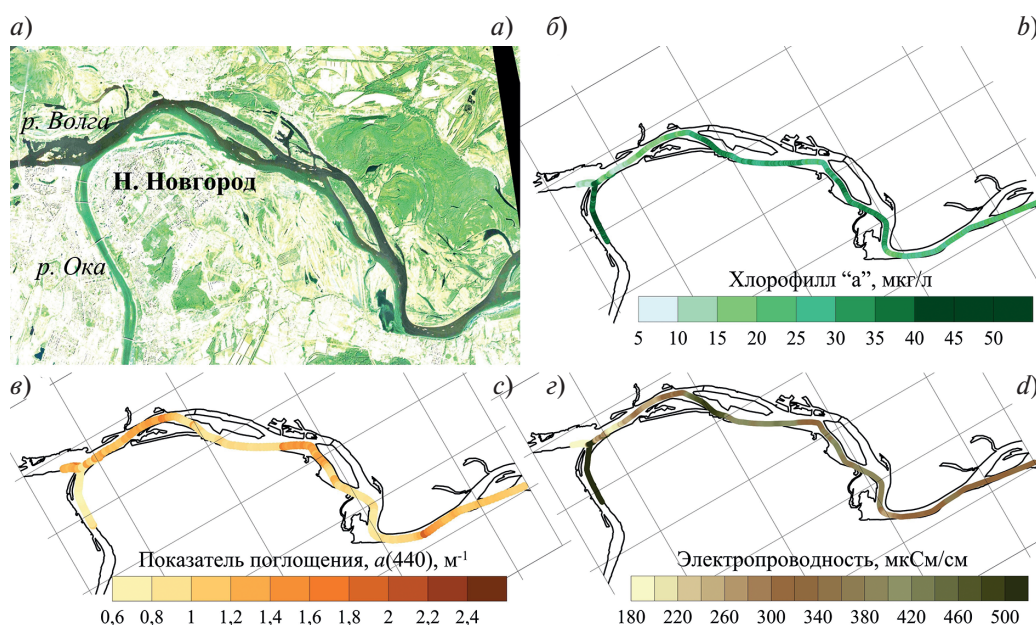


Рис. 5. RGB-композит слияния двух рек Волга и Ока в районе Нижнего Новгорода 20 сентября 2023 (а) и распределения хлорофилла *a* (б), показатель поглощения *a*(440) (в) и электропроводности (г).

Fig. 5. RGB composite of the confluence of Volga and Oka in the Nizhny Novgorod on September 20, 2023 (a), the corresponding distribution of chlorophyll *a* (b), absorption coefficient *a*(440) (c), and conductivity (d).

4.4. Сезонная изменчивость биооптических характеристик

Исследование временных масштабов изменчивости характеристик среды является обязательным вопросом при разработке биооптических алгоритмов для внутренних водоемов, хотя не все исследователи уделяют ему должное внимание [29]. Часто причиной расхождения измеренных и восстановленных по спутниковым данным характеристик является слишком большой временной интервал между спутниковой съемкой и подспутниковыми измерениями [30]. Представленные на рис. 4 пространственные распределения биооптических и гидрологических характеристик наглядно демонстрируют еще и временную изменчивость характеристик на масштабах 1–3 суток после смены погоды с пасмурной и ветренной на ясную и штилевую.

Совместный анализ данных обеих экспедиций (в июле и в сентябре) позволил выявить и сезонные изменения в содержании ОВ. Рис. 6 демонстрирует снижение ОВ к осени на примере двух противоположно расположенных районов исследуемой акватории, а именно на примере слияния Волги и Оки в Чебоксарском водохранилище и Волги и Камы в Куйбышевском водохранилище. Установлено, что в июле-августе по отношению к сентябрю показатель поглощения на русле Камы снижается с $1,5 \text{ м}^{-1}$ до $1,3 \text{ м}^{-1}$, на пойме по бокам от русла Камы с $2,0 \text{ м}^{-1}$ до $1,6 \text{ м}^{-1}$, на русле Волги с $3,1 \text{ м}^{-1}$ до $1,8 \text{ м}^{-1}$, по бокам от русла Волги с $2,8 \text{ м}^{-1}$ до $2,1 \text{ м}^{-1}$, на русле Оки с $2,0 \text{ м}^{-1}$ до $1,5 \text{ м}^{-1}$. Это снижение связано с фотодеградацией органики и, вероятно, ее потреблением развивающимся фитопланктоном.

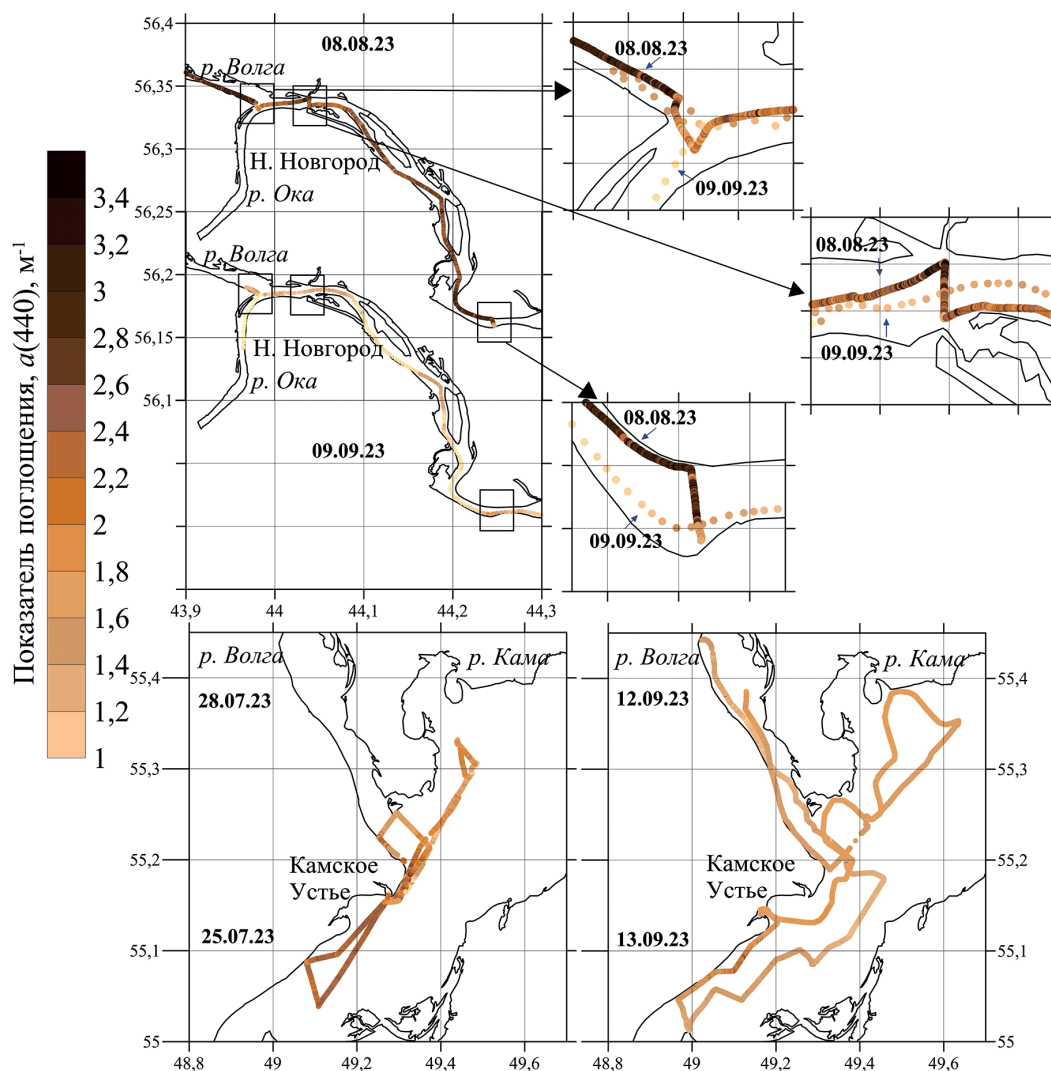


Рис. 6. Сезонная изменчивость содержания органического вещества (показателя поглощения на 440 нм) на примере слияния Волги и Оки в Чебоксарском водохранилище и Волги и Камы в Куйбышевском водохранилище

Fig. 6. Seasonal variability of organic matter (absorption coefficient at 440 nm) using the example of the confluence of the Volga and Oka in the Cheboksary Reservoir and the Volga and Kama in the Kuibyshev Reservoir

5. Заключение

В работе представлены результаты натурных измерений ряда биооптических и гидрофизических характеристик на средней Волге в 2023 г. Измерения выполнены квазинепрерывно с высоким пространственным разрешением (3 м), что принципиально отличает их от предшествующих, где разрешение составляло единицы и десятки километров. Полученные значения параметров среды не только хорошо согласуются с ли-

тературными данными, но и значительно дополняют их в части понимания вариаций среды на различных пространственно-временных масштабах. В настоящей работе отсутствуют причинно-следственные связи, описывающие особенности продуктивности водоема и типичные для работ лимнологов и гидробиологов. Это связано с тем, что настоящее исследование преследует другую цель — формирование «биооптического» портрета реки Волга, т. е. исследование гидрооптических характеристик верхнего слоя реки, спектральный цвет которого регистрируется космическими сканерами цвета и может быть «раскодирован» в содержание взвеси и растворенных в воде веществ в верхнем слое.

Продemonстрированные существенные вариации биооптических характеристик на масштабах 500 км указывают на наличие как продуктивных вод, так и мутных или относительно чистых по содержанию примесей, но богатых растворенной органикой, а также смешанных.

В мировой практике спутникового мониторинга внутренних водоемов, создание таких массивов синхронизированных данных является на сегодня регулярной работой. Это позволяет, используя возможности машинного обучения, точно классифицировать оптический тип вод, построить гибкий биооптический алгоритм и определить исследуемый водоем среди других водных объектов.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Кайнову Алексею Борисовичу за обеспечение экспедиции, активное участие и дельные советы в ходе проведения работ, а также Гречушниковой Марии Георгиевне и Воденевой Екатерине Леонидовне за обсуждение и помощь в интерпретации результатов.

Acknowledgements

The authors are grateful to Alexey Borisovich Kainov for providing the expedition, active participation and advice during the work, and to Maria Georgievna Grechushnikova and Ekaterina Leonidovna Vodeneeva for discussion and assistance in interpreting the results.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>, в части исследования трансформации биооптических характеристик волжских вод и разработки биооптических моделей, а также по теме Госзадания FMWE-2024–0015 «Гидрофизические процессы, формирующие экологическое состояние внутренних и окраинных морей и прибрежной зоны океана».

Funding

The research was supported by RNF grant No. 23-17-00071 (“Volga bio-optical algorithms”), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>, in the part of the study of the transformation of bio-optical characteristics of Volga waters and development of bio-optical models, as well as under the topic of State Task FMWE-2024-0015 “Hydrophysical processes shaping the ecological state of inland and marginal seas and coastal ocean zone”.

Литература

1. Global Environment Monitoring System for Freshwater. URL: <https://ceowatermandate.org/resources/global-environment-monitoring-system-for-freshwater-2019/> (дата обращения: 12.11.2023)
2. USGS Water Resources Mission Area. URL: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources> (дата обращения: 12.11.2023)
3. Water Framework Directive. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en (дата обращения: 12.11.2023)
4. The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. URL: <https://oceandecade.org/ru/news/ocean-decade-unveils-new-set-of-endorsed-actions-on-all-continent/> (дата обращения: 12.11.2023)
5. Ferreira J.G., Vale C., Soares C.V., Salas F., Stacey P.E., Bricker S.B., Silva M.C., Marques J.C. Monitoring of coastal and transitional waters under the E.U. water framework directive. // Environmental monitoring and assessment. 2007. Vol. 135. P. 195–216. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9643-0>
6. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, No. 1. P. 64. <https://doi.org/10.3390/rs11010064>

7. *Adjovu G.E., Stephen H., James D., Ahmad S.* Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 7. P. 1938. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>
8. Национальный проект «Экология» (2019–2024 гг.) URL: [https://xn-80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn -- plai/projects/ekologiya/](https://xn-80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/ekologiya/) (дата обращения: 12.11.2023)
9. Федеральный проект «Вода России». URL: <https://voda.org.ru/> (дата обращения: 12.11.2023)
10. Государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды». URL: <http://government.ru/rugovclassifier/874/events/> (дата обращения: 12.11.2023)
11. *Soomets T., Uudeberg K., Jakovels D., Zagars M., Reinart A., Brauns A., Kutser T.* Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 23. P. 2883. <https://doi.org/10.3390/rs11232883>
12. *Pahlevan N., Smith B., Schalles J., Binding C., Cao Z., Ma R., Alikas K., Kangro K., Gurlin D., Hà N., Matsushita B., Moses W., Greb S., Lehmann M.K., Ondrusek M., Oppelt N., Stumpf R.* Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 240. P. 111604. doi.org/10.1016/j.rse.2019.111604
13. *Буторин Н.В.* О прозрачности и мутности воды Горьковского водохранилища // *Труды Института биологии водохранилищ*. 1959. Т. 2, № 5. С. 204–211.
14. Куйбышевское водохранилище / Под ред. Монакова А.В. Л.: Наука, 1983. 213с.
15. *Шитиков В.К., Выхристюк Л.А., Паутова В.Н., Зинченко Т.Д.* Комплексное экологическое районирование Куйбышевского водохранилища // *Водные ресурсы*. 2007. Т. 34, № 4. С. 481–489.
16. *Буторин Н.В.* Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
17. *Минеева Н.М.* Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги / Отв. ред. А.И. Копылов. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
18. *Корнева Л.Г.* Современное состояние фитопланктона водохранилищ Верхней Волги // *Биологические ресурсы, их сохранение и использование* / Под ред. В.П. Семерного. Ярославль: ЯрГУ, 1999. С. 81–91.
19. *Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А.* Влияние массового развития цианобактерий на формирование качества воды куйбышевского водохранилища (проблема и пути решения) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2023. Т. 25, № 5. С. 164–174. [doi:10.37313/1990-5378-2023-25-5-164-174](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-5-164-174)
20. *Мингазова Н.М., Набеева Э.Г., Чебан Е.Ю., Павлова Л.Р., Яковлева Е., Путинцев Р., Мак Кироя К.А., Сиво Л., Шавалиева А.* Гидрохимическая характеристика Куйбышевского водохранилища (по материалам экспедиции «Плавучий Университет» // *Проблемы экологии Волжского бассейна*. 2021. С. 22–22.
21. *Эдельштейн К.К.* Динамика водной массы речной части Горьковского водохранилища / *Динамика водных масс водохранилищ*. Л.: Изд-во АН СССР, 1965. С. 39–44.
22. *Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V.* Ultraviolet Fluorescence Lidar (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. P. 4405–4422. doi.org/10.3390/rs5094405
23. *Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н.* Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // *Океанология*, 2014. Т. 54, № 4. С. 704–711. [doi:10.7868/S0030157414040066](https://doi.org/10.7868/S0030157414040066)
24. *Mueller J.L., Bidigare R.R., Trees C., Balch W.M., Dore J., Drapeau D.T., Karl D., Van Heukelem L., Perl J.* Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, Volume 5: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols // *Greenbelt, MD. Goddard Space Flight Space Center*. 2003. P. 5–24. [doi:10.25607/OBP-67](https://doi.org/10.25607/OBP-67)
25. *Kessler N., Armoza-Zvuloni R., Wang S., Basu S., Weber P.K., Stuart R.K., Shaked Y.* Selective collection of iron-rich dust particles by natural Trichodesmium colonies // *The ISME Journal*. 2020. Vol. 14. P. 91–103. [doi:10.1038/s41396-019-0505-x](https://doi.org/10.1038/s41396-019-0505-x)
26. *Рабинович Е.* Фотосинтез. Т. 1. / пер. с англ. Н.Д. Леонова, под ред. и с предисл. А.А. Ничипоровича. М.: Изд-во иностр. лит., 1951. 648 с.
27. *Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M., Dobrokhotova D., Leshchev G., Vodeneeva E., Sharagina E., Kolesnikov A.* Investigation of Water Dynamics Nearby Hydroelectric Power Plant of the Gorky Reservoir on Water Environment: Case Study of 2022 // *Water*. 2023. Vol. 15. P. 3070. [doi:10.3390/w15173070](https://doi.org/10.3390/w15173070)
28. *Немировская И.А.* Насколько загрязнена Волга // *Природа*. № 4. 2011. С. 36–44.
29. *Hansen C.H., Burian S.J., Dennison P.E., Williams G.P.* Spatiotemporal Variability of Lake Water Quality in the Context of Remote Sensing Models // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. P. 409. [doi:10.3390/rs9050409](https://doi.org/10.3390/rs9050409)
30. *Molkov A., Fedorov S., Pelevin V.* Toward Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-3/OLCI Images of Productive Waters // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. P. 3663. [doi:10.3390/rs14153663](https://doi.org/10.3390/rs14153663)

References

1. Global Environment Monitoring System for Freshwater. URL: <https://ceowatermandate.org/resources/global-environment-monitoring-system-for-freshwater-2019/> (Accessed: 12.11.2023)
2. USGS Water Resources Mission Area. URL: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources> (Accessed: 12.11.2023)
3. Water Framework Directive. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en (Accessed: 12.11.2023)
4. The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. URL: <https://oceandecade.org/ru/news/ocean-decade-unveils-new-set-of-endorsed-actions-on-all-continent/> (Accessed: 12.11.2023).
5. Ferreira J.G., Vale C., Soares C.V., Salas F., Stacey P.E., Bricker S.B., Silva M.C., Marques J.C. Monitoring of coastal and transitional waters under the E.U. water framework directive. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007;135:195–216. doi:10.1007/s10661-007-9643-0
6. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sensing*. 2019;11(1): 64. doi:10.3390/rs11010064
7. Adjovu G.E., Stephen H., James D., Ahmad S. Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters. *Remote Sensing*. 2023;15(7):1938. doi:10.3390/rs15071938
8. National Project “Ecology” (2019–2024). URL: <https://xn-80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/ekologiya/> (Accessed: 12.11.2023)
9. Federal project “Water of Russia”. URL: <https://voda.org.ru/> (Accessed: 12.11.2023)
10. State Program of the Russian Federation “Environmental Protection”. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/874/events/> (Accessed: 12.11.2023).
11. Soomets T., Uudeberg K., Jakovels D., Zagars M., Reinart A., Brauns A., Kutser T. Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3. *Remote Sensing*. 2019;11(23):2883. doi:10.3390/rs11232883
12. Pahlevan N., Smith B., Schalles J., Binding C., Cao Z., Ma R., Alikas K., Kangro K., Gurlin D., Hà N., Matsushita B., Moses W., Greb S., Lehmann M.K., Ondrusek M., Oppelt N., Stumpf R. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*. 2020;240:111604. doi:10.1016/j.rse.2019.111604
13. Butorin N.V. About transparency and turbidity of water of the Gorki Reservoir. *Trudy Instituta Biologii Vodoxranilishh*. 1959;2(5):204–211 (in Russian).
14. Monakov A.V. (ed.) *Kuibyshev Reservoir*. Leningrag: Nauka; 1983. 213 p. (in Russian).
15. Shitikov V.K., Vykhristyuk L.A., Pautova V.N., Zinchenko T.D. Comprehensive ecological zoning of the Kuibyshev reservoir. *Water Resources*. 2007;34(4):450–458. doi:10.1134/S0097807807040100
16. Butorin N.V. Hydrological processes and dynamics of water masses in the Volga Cascade Reservoirs. Leningrag, Nauka, 1969. 322 p. (in Russian).
17. Mineeva N.M. Plankton primary production in the Volga River reservoirs / Ed. by A.I. Kopylov. Yaroslavl: Print House, 2009. 279 p. (in Russian).
18. Korneva L.G. Modern state of phytoplankton of the Upper Volga reservoirs. In: Semerny V.P. (ed.). *Biological Resources, their conservation and use*. Yaroslavl: Yaroslavl State University; 1999. 81–91 (in Russian).
19. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Influence of the mass development of cyanobacteria on the formation of the water quality of the Kuibyshev reservoir (problem and solutions). *Izvestiya of Samara Scientific Center of The Russian Academy of Sciences*. 2023;25(5):164–174 (in Russian). doi:10.37313/1990-5378-2023-25-5-164-174
20. Mingazova N.M., Nabeeva E.G., Cheban E. Yu., Pavlova L.R., Yakovleva E., Putintsev R., Mac Quiroa Ch.A., Landi S., Shavaliyeva A. Hydrochemical characteristics of the Kuibyshev Reservoir (based on the materials of the floating university expedition). *Problemy Ekologii Volzhskogo Basseina: Proceedings of the 6th Scientific Conference*, N. Novgorod, November 24–25, 2021. Iss. 4. Volga State University of Water Transport; 2021. 35 p.
21. Edelstein K.K. Dynamics of the water mass of the river part of the Gorki Reservoir / Dynamics of water masses of reservoirs. Leningrag: Izdvo AS USSR; 1965. P. 39–44 (in Russian).
22. Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V. Ultraviolet Fluorescence Lidar (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions. *Remote Sensing*. 2013;5:4405–4422. doi:10.3390/rs5094405
23. Konovalov B.V., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Novigatsky A.N. Determination of the concentration of mineral particles and suspended organic substance based on their spectral absorption. *Oceanology*. 2014;54(5):660–667. doi:10.1134/S0001437014040067
24. Mueller J.L., Bidigare R.R., Trees C., Balch W.M., Dore J., Drapeau D.T., Karl D., Van Heukelem L., Perl J. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, Volume 5: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols. *Greenbelt, MD. Goddard Space Flight Space Center*. 2003;5–24. doi:10.25607/OBP-67

25. Kessler N., Armoza-Zvulon R., Wang S., Basu S., Weber P.K., Stuart R.K., Shaked Y. Selective collection of iron-rich dust particles by natural *Trichodesmium* colonies. *The ISME Journal*. 2020;14:91–103. doi:10.1038/s41396-019-0505-x
26. Rabinowitz E. *Photosynthesis*. V. 1. / translated from English by N.D. Leonov, ed. and with a foreword by A.A. Nichiporovich. Moscow: Izd. inostr. Lit.; 1951. 648 p. (in Russian).
27. Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M., Dobrokhotova D., Leshchev G., Vodeneeva E., Sharagina E., Kolesnikov A. Investigation of Water Dynamics Nearby Hydroelectric Power Plant of the Gorky Reservoir on Water Environment: Case Study of 2022. *Water*. 2023;15:3070. doi:10.3390/w15173070
28. Nemirovskaya I.A. How polluted is the Volga? *Priroda*. 2011;4:36–44 (in Russian).
29. Hansen C.H., Burian S.J., Dennison P.E., Williams G.P. Spatiotemporal variability of lake water quality in the context of remote sensing models. *Remote Sensing*. 2017;9:409. doi:10.3390/rs9050409
30. Molkov A., Fedorov S., Pelevin V. Toward Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-3/OLCI Images of Productive Waters. *Remote Sensing*. 2022;14:3663. doi:10.3390/rs14153663

Об авторах

- МОЛЬКОВ Александр Андреевич, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-8550-2418, Scopus AuthorID: 55377777800, WoS ResearcherID: A-3623-2014, SPIN-код (РИНЦ): 8959-5235, e-mail: molkov@ipfran.ru
- КАПУСТИН Иван Александрович, заведующий лабораторией ННГУ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593-2014, SPIN-код (РИНЦ): 7060-5757, e-mail: kia@ipfran.ru
- ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич, старший научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-6528-7589, Scopus AuthorID: 54410480500, WoS ResearcherID: D-5271-2015, SPIN-код (РИНЦ): 1336-6994, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru
- ЛЕЩЕВ Георгий Владимирович, младший научный сотрудник ННГУ, ORCID: 0000-0001-5574-7935, Scopus AuthorID: 57213165519, SPIN-код (РИНЦ): 5370-0731, e-mail: georgeleshev@ipfran.ru
- ДОБРОХОТОВА Дарья Васильевна, младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981-2022, SPIN-код (РИНЦ): 9740-3806, e-mail: vostryakova@ipfran.ru
- КОЛЬЦОВА Екатерина Сергеевна, лаборант-исследователь ННГУ, ORCID: 0000-0002-3089-4987, WoS ResearcherID: KPA-51862024, e-mail: koltsova.es@phystech.edu
- КОНОВАЛОВ Борис Васильевич, ведущий инженер ННГУ. SPIN-код (РИНЦ): 58631, e-mail: bvkonov@yandex.ru
- ДРОЗДОВА Анастасия Николаевна, старший научный сотрудник ННГУ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-5547-6693, Scopus AuthorID: 57189681902, WoS ResearcherID: F-8435-2011, SPIN-код (РИНЦ): 2156-3769, e-mail: asya-nd@yandex.ru
- БОГАТОВ Николай Андреевич, ведущий программист ИПФ РАН, ORCID: 0000-0001-5034-888X, SPIN-код (РИНЦ): 9519-3017, e-mail: nbogatov@ipfran.ru
- ЧУШНЯКОВА Алёна Михайловна, младший научный сотрудник ННГУ, e-mail: zdesssss@yandex.ru
- КИРИЛЛОВ Алексей Геннадьевич, заведующий сектором ИПФ РАН, член-корреспондент Академии медико-технических наук РФ, ORCID: 0000-0001-7077-4018, e-mail: kir@ipfran.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-8

УДК 556.556

© Д. В. Доброхотова^{1,2*}, И. А. Капустин^{1–3}, А. А. Мольков^{1–3}, Г. В. Лещев^{1,2}, А. В. Ермошкин^{1,2}, 2025

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

³Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

*vostryakova@ipfran.ru

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ТЕЧЕНИЙ В ВОЛЖСКОМ КАСКАДЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

Статья поступила в редакцию 25.11.2024, после доработки 22.01.2025, принята в печать 17.02.2025

Аннотация

Данные о структуре течений в большинстве водохранилищ Волжского каскада получены в прошлом веке и корректно описывают современную структуру течений лишь в общем. В работе представлены структуры течений, полученные в ходе натурных измерений в 2023 и 2024 годах с помощью акустического профилографа течений, на разном удалении от ГЭС в четырех водохранилищах: Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском, Волгоградском. Настоящая работа представляет собой краткий обзор имеющейся базы данных измерений течений в акватории водохранилищ Волжского каскада. Продемонстрированы продольные разрезы речной части Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ, пространственные структуры течений в озерных частях рассматриваемых водохранилищ. Показано, что средняя скорость течения в речной части водохранилища падает при удалении от плотины ГЭС, структура течений в озерной части водохранилища обладает высокой изменчивостью в зависимости от режима расхода через ГЭС. Представлены локальные особенности течений, связанные с регулированием стока на гидроузлах, к которым, согласно измерениям, относятся формирование круговоротов, изменение скоростей и направлений течений.

Ключевые слова: течение, ADCP-измерения, водохранилища Волжского каскада, режим работы ГЭС, речная и озерная части водохранилища, Волга

© D. V. Dobrokhotova^{1,2*}, I. A. Kapustin^{1–3}, A. A. Molkov^{1–3}, G. V. Leshchev^{1,2}, A. V. Ermoshkin^{1,2}, 2025

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod 603022, Russia

²A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia

³Volzhsky State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia

*vostryakova@ipfran.ru

PECULIARITIES OF CURRENTS IN THE VOLGA RESERVOIR CASCADE

Received 25.11.2024, Revised 22.01.2025, Accepted 17.02.2025

Abstract

Data on the current structure in most reservoirs of the Volga Cascade were obtained in the last century and correctly describe the current structure only in general terms. The paper presents current structures at different distances from the HPPs in the Gorky, Cheboksary, Kuibyshev, and Volgograd reservoirs. The present work is a brief review of the existing database of current measurements in the water area of the Volga Cascade reservoirs. The data were obtained during field measurements in 2023 and 2024 using an acoustic current profiler. Longitudinal sections of the river part of the Cheboksarsky and Kuibyshev reservoirs, spatial structures of currents in the lake parts of the considered reservoirs are demonstrated. It is shown that the average current velocity in the river part of the reservoir decreases with distance from the HPP dam. The structure of currents in the lake part of the reservoir has high variability depending on the flow regime through the HPP. Local features of currents related to flow regulation at hydrosystems are presented, which include formation of whirlpools, changes in velocity and current directions.

Keywords: Current, ADCP measurements, Volga cascade reservoirs, flow rate at HPP, river and lake parts of the reservoirs, Volga

Ссылка для цитирования: Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев Г.В., Ермошкин А.В. Об особенностях течений в Волжском каскаде водохранилищ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 92–105. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-8

For citation: Dobrokhotova D.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Leshchev G.V., Ermoshkin A.V. Peculiarities of Currents in the Volga Reservoir Cascade. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):92–105. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-8

1. Введение

В настоящее время Волга представляет собой каскад водохранилищ, общей чертой которых является сезонное регулирование стока с весенним накоплением и последующей сработкой водохранилищ [1]. Помимо сезонного, имеет место суточное регулирование расхода через ГЭС, отвечающее потребностям в электроэнергии. Зарегулирование речного стока приводит к постепенному изменению гидрологических, гидрооптических, гидробиологических и гидрохимических показателей воды и формированию комплекса вторичных грунтов [2, 3]. Мониторинг водохранилищ ведется на сетке гидрологических постов, функционирующих с момента их наполнения, хотя некоторые из постов функционировали и до наполнения водохранилищ. Однако в настоящее время для оценки влияния водохранилищ на газообмен [4, 5], региональный климат [6, 7], флору и фауну [8, 9] все чаще привлекаются данные спутниковых сканеров цвета высокого и среднего пространственных разрешений.

Несмотря на то, что течения играют определяющую роль в переносе водных масс, примесей, перемешивании, накоплении донных отложений и создании условий для жизнедеятельности различных организмов, данные о структуре течений в большинстве водохранилищ получены в прошлом веке путем измерений с помощью плавучих самописцев и вертушек на гидрологических постах [10]. На основе таких дискретных данных построена усредненная структура течений [1, 11, 12], корректно описывающая современную лишь обобщенно. К настоящему времени изменившиеся со времени наиболее активных измерений [1, 2, 11, 12] рельеф дна и уровень воды, а также переменный объем сброса воды через ГЭС, привели к локальным изменениям в структуре течений. Такие изменения течений затруднительно учитывать при верификации методов спутникового мониторинга внутренних водоемов с помощью данных, полученных в прошлом веке. К примеру, структура течений в акватории наиболее молодого Чебоксарского водохранилища (наполнение 1980 г.) представлена в литературе [12] до наполнения в составе Куйбышевского водохранилища. Исследования в Чебоксарском водохранилище в большинстве случаев направлены на гидрологические и экологические проблемы в связи с его заполнением до промежуточного уровня [13, 14], однако ни структура течений, ни влияние на течение режима работы ГЭС в литературе не представлены. Со времени регулярных измерений [1, 11, 12] изменился суточный режим работы ГЭС, как, например, увеличения расхода в утренние и вечерние часы сменилось на дневное увеличение стока в Нижегородской ГЭС [11]. Учитывая влияния суточного регулирования стока на течения (согласно [15] зона влияния на больших реках не превышает 100 км), смена суточного регулирования приводит к существенным изменениям в режиме течений.

Для оценок влияния гидродинамического режима ГЭС на развитие фитопланктона [16], изменение удельной электропроводности и температуры [17], распределение рыб [18] и формирование донных осадков [19] используются гидродинамические модели [20, 21] и данные среднесуточных расходов и уровней. Для апробации, верификации моделей измерение течений в ходе натурных измерений необходимы. Использование данных, полученных в прошлом веке, для развития методов спутникового мониторинга внутренних водоемов, для восстановления поля течений дистанционными методами (например, методом МСС [22–24]), не представляются корректным. Как показано в [23, 24], обобщенное представление о структуре течений не всегда может объяснить некоторые возникающие эффекты в отсутствие непосредственных измерений.

В настоящей работе продемонстрирована структура средних течений на разных участках четырех водохранилищ Волжского каскада на основе данных натурных измерений, проведенных в 2023 и 2024 гг. Измерения выполнены в период сработки водохранилища до заданной отметки, т. е. после весеннего накопления. В работе приводятся средние по глубине течения, ветровые течения не рассматриваются.

2. Методы и подходы

В безледный период в 2023 г. в трех водохранилищах были проведены измерения магнитуды и направления течений. На рис. 1 представлены районы исследований, а именно южная часть Горьковского водохранилища вблизи Нижегородской ГЭС, Чебоксарское водохранилище (от Нижнего Новгорода до Чебоксарской ГЭС), Куйбышевское водохранилище (от Чебоксарской ГЭС до устья р. Камы). Синими точками с соответствующими подписями отмечено расстояние от истока Волги в километрах.

Измерения в южной части Горьковского водохранилища осуществлялись 1 августа 2023 г. Район исследований в увеличенном масштабе представлен на рис. 1 и включал затопленные русло и пойму Волги. Измерения в Чебоксарском водохранилище проводились на судовом ходу (преимущественно над руслом) 9–10 сентября и 16–17 сентября 2023 г., в Куйбышевском (до устья р. Камы) — 10–11 сентября и 14–15 сентября 2023 г., а в районе слияния Волги и Камы — 22–25 июля и 12–13 сентября 2023 г.

В 2024 г. с 31 мая по 5 июня и с 17 по 21 августа осуществлялись измерения в озерной части Волгоградского водохранилища напротив р. Еруслан, г. Камышин и с. Олень (отмечены на рис. 2 синими прямоугольниками).



Рис. 1. Район исследований в 2023 г: южная часть Горьковского водохранилища, Чебоксарское водохранилище, Куйбышевское водохранилище

Fig. 1. Studied water sites in 2023: southern part of the Gorky Reservoir, Cheboksary Reservoir, Kuibyshev Reservoir

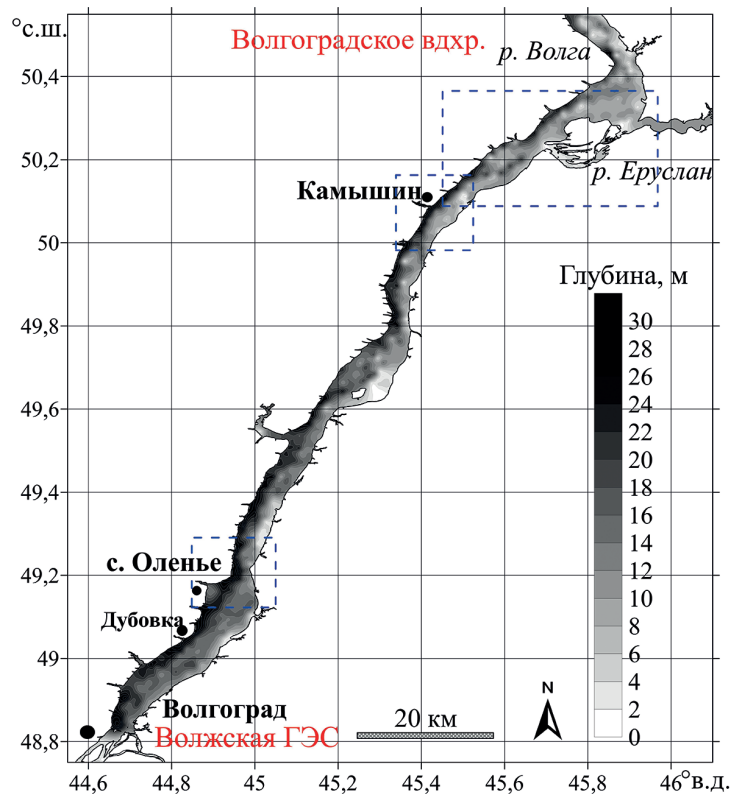


Рис. 2. Район исследований в 2024 г: Волгоградское водохранилище

Fig. 2. Studied water sites in 2024: Volgograd Reservoir

Величина и направление течений непрерывно регистрировались с использованием акустического доплеровского профилографа течений ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz вдоль маршрутов следования ма-

ломерных исследовательских судов. ADCP размещался на борту плавучей лаборатории ИПФ РАН «Геофизик» для измерений в Горьковском водохранилище [25], на моторной лодке «Волжанка-46» для измерений в Камском устье и в Волгоградском водохранилище, и на стальной водоизмещающей моторной яхте «Pedro Skiron 35» для измерений в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах. Скорость движения судов не превышала 13 км/ч, обеспечивая корректную работу ADCP. Данные усреднялись по 60 пингам, что соответствовало примерно 30 с по времени (80 м по расстоянию).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Горьковское водохранилище

Течения в южной части Горьковского водохранилища существенно зависят от суточных изменений расхода воды через Нижегородскую ГЭС [26, 27]. В безледный период с мая по октябрь согласно информации, предоставленной РусГидро [28] график расхода представляет периодическую последовательность «импульсов» повышенного стока. Рис. 4, *а* демонстрирует пример регулирования стока за сутки 01.08.23. В этот день было сделано несколько разрезов водохранилища: в момент максимального пикового сброса (около 2300 м³/с) и при минимальном ночном значении расхода (около 1000 м³/с). На рис. 3 (*б*, *в*) показано усредненное векторное поле скоростей течений в южной части Горьковского водохранилища для двух периодов времени.

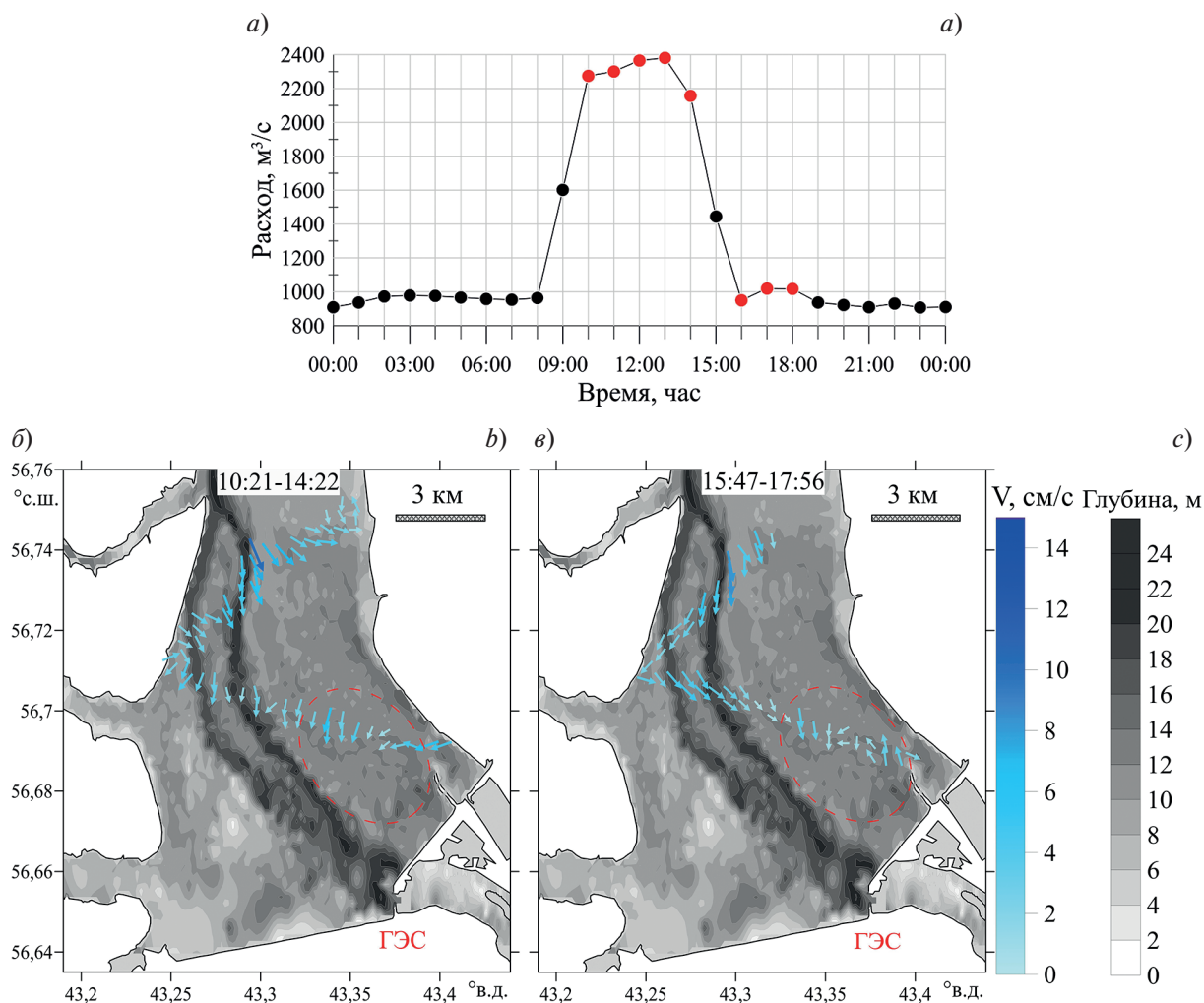


Рис. 3. Почасовой расход через Нижегородскую ГЭС 01.08.2023, где красными точками отмечено время измерений, (*а*) и соответствующие векторные поля средних по глубине течений, наложенных на батиметрию, для двух интервалов времени в течение указанной даты: 10:21–14:22 (*б*) и 15:47–17:56 (*в*)

Fig. 3. Hourly flow rate at Nizhny Novgorod HPP for 01.08.2023, where red dots indicate the time of measurements, (*a*) and corresponding vector fields of depth-averaged currents superimposed on bathymetry for two time intervals: 10:21–14:22 (*b*) and 15:47–17:56 (*c*)

Из рис. 3 можно видеть изменения структуры течений при вариациях расхода воды через ГЭС. Поле течений, измеренное в момент максимального суточного сброса, демонстрирует преимущественно южное направление над руслом (в сторону ГЭС) и юго-западное — над поймой. Среднее значение скорости составило 5 см/с, максимальные значения скорости над руслом — 14 см/с, над поймой — 6 см/с. При уменьшении расхода воды через ГЭС магнитуа течений уменьшается до 9 см/с над руслом и до 4 см/с над поймой. Над поймой формируется обратное течение, встречное русловому потоку, т. е. интенсифицируется круговорот (на рис. 3 соответствующая область отмечена красной пунктирной линией), приводящий к захвату речных выносов и образованию локализованных масс воды с отличными от окружающей воды характеристиками, а также неоднородному перераспределению фитопланктона по акватории [27, 29, 30]. Разрез круговорота наблюдается в представленных данных.

3.2. Чебоксарское водохранилище

На рис. 4 представлен продольный разрез Чебоксарского водохранилища вдоль судового хода, на который наложено цветное поле магнитуды течения. Начало измерений в Чебоксарском водохранилище совпадает с отметкой 906 км, в области слияния Волги и Оки в г. Нижний Новгород, что на 53 км ниже Нижегородской ГЭС. На рис. 4 сверху приведена примерная ширина Волги. Направление течений в водохранилище русловое/стоковое.

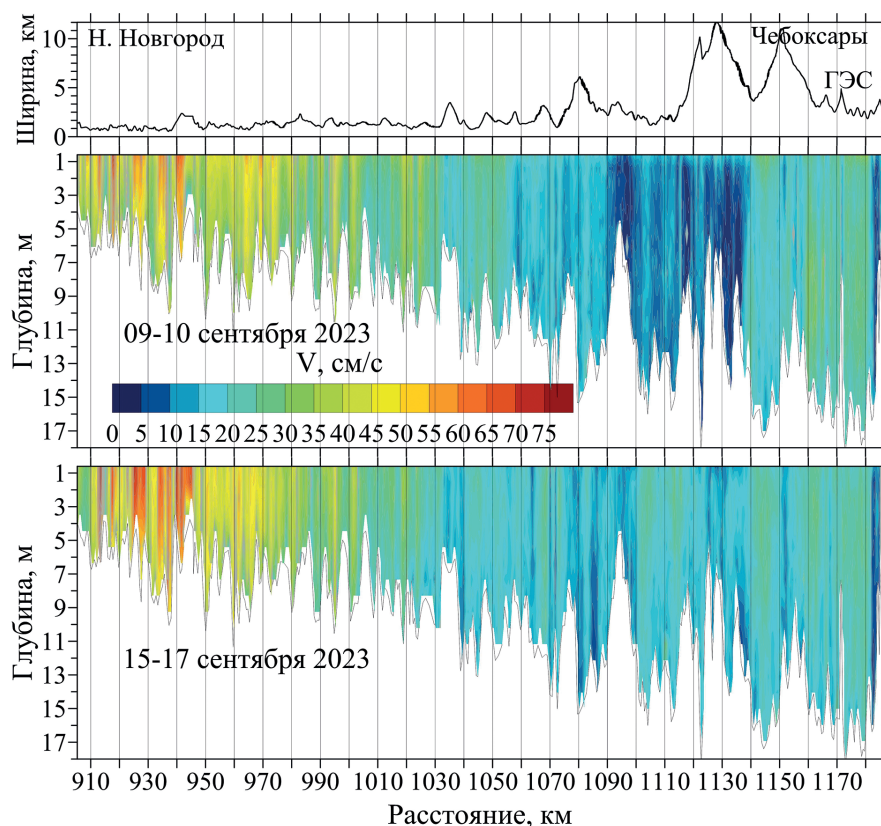


Рис. 4. Продольный разрез Чебоксарского водохранилища с наложенным цветовым градиентом магнитуды течений. Сверху — примерная ширина реки

Fig. 4. Longitudinal section of the Cheboksary Reservoir with superimposed color gradient of current magnitude. Approximate width of the river (above)

Скорость течения вдоль судового хода уменьшается при удалении от Нижегородской ГЭС. Оба трека демонстрируют схожее распределение скоростей на участке от 906 до 1045 км, т. е. до озерной части водохранилища. Незначительные отличия в скоростях, например, на расстояниях 1020–1035 км, связаны с разницей в положении пересечения поперечных разрезов реки треками, вдоль которых осуществлялись измерения (разные глубины, расстояние от берегов). Помимо участка около водосброса Нижегородской

ГЭС, где скорости составляли 90–100 см/с [27], наибольшие скорости течения 60–75 см/с наблюдались на расстоянии 913 км и 925 км в наиболее узкой части водохранилища (ширина около 500 м). Минимальная скорость течения на судовом ходу была менее 6 см/с в озерной части водохранилища 10 сентября.

Сравнение скоростей течений в 2023 г. с данными 2019 г. представлено на рис. 5, а. В 2019 году измерения течений проводились поперек русла реки [31]. Точками отмечены средние скорости в точке пересечения треков в 2023 г. и поперечных разрезов Волги в 2019 г., линиями обозначены данные магнитуд 2023 года, усредненные методом плавающего окна по 10 точкам. На рис. 5, б представлены значения почасовых расходов через Нижегородскую ГЭС в момент измерений с учетом времени (скорости) добегания расхода [15].

На рис. 5, а видно, что пространственные распределения средних скоростей в 2019 и 2023 годах схожи: скорость течения уменьшается по мере удаления от ГЭС, магнитуды на поперечном разрезе реки близки. Значения расхода через Нижегородскую ГЭС при измерениях в 2023 и 2019 годах с учётом времени добегания отличаются, но, несмотря на это, на поперечных разрезах Волги скорости близки. Увеличение расхода в структуре течений на расстоянии более 53 км от ГЭС не наблюдается, а незначительные различия связаны с разницей в положении пересечения поперечных разрезов реки треками, вдоль которых осуществлялись измерения.

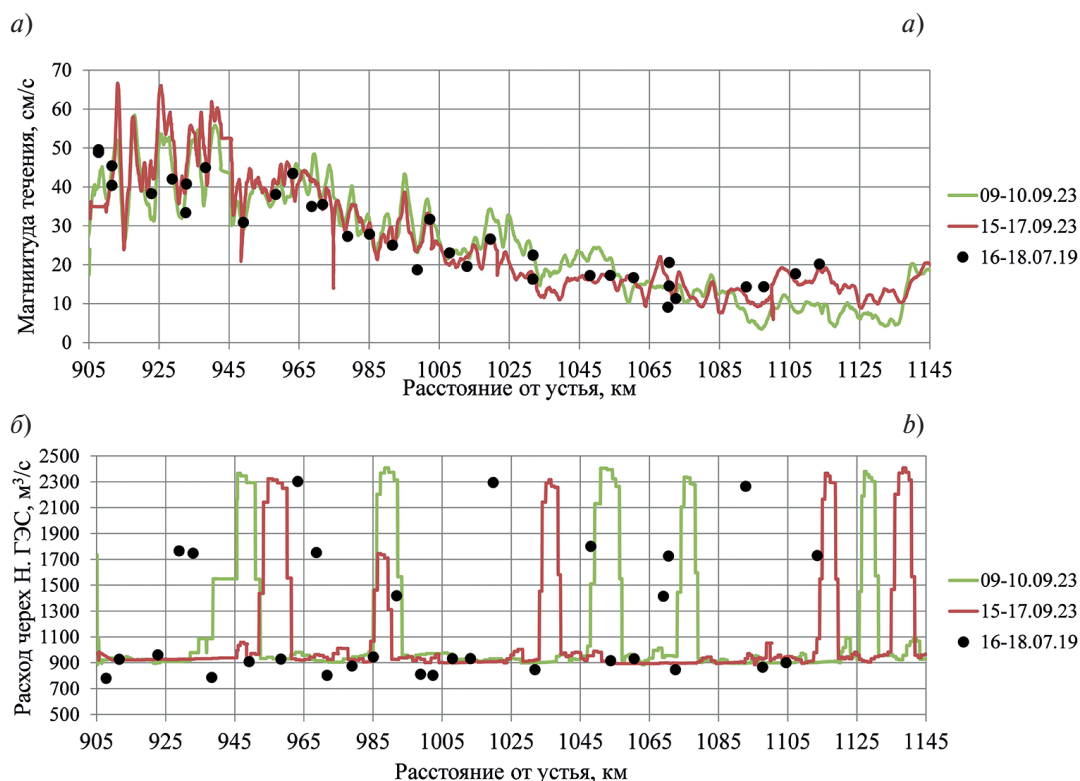


Рис. 5. Сравнение скоростей течений в 2023 г. с данными 2019 г. (а) и значения расхода через Нижегородскую ГЭС в момент измерений с учетом времени добегания расхода (б)

Fig. 5. Comparison of flow velocities in 2023 with the data of 2019 (а) and flow rates through Nizhegorodskaya HPP at the moment of measurements, taking into account the time of flow run-up time (б)

При точном повторении треков, различия скорости в озерной части в разные дни, по-видимому, связаны с суточным режимом расхода через Чебоксарскую ГЭС. На рис. 6 представлены векторные поля средней по глубине скорости в озерной части Чебоксарского водохранилища.

Среднее значение скорости течения в озерной части Чебоксарского водохранилища составило 14 см/с, увеличение скорости до 25–27 см/с наблюдалось в области сужения акватории перед Чебоксарской ГЭС. Предполагая, что режим расхода через ГЭС аналогичен расходу через Нижегородскую ГЭС, разные магнитуды течения в наиболее широкой части водохранилища можно объяснить разным временем измерений и откликом на изменения уровня расхода через ГЭС.

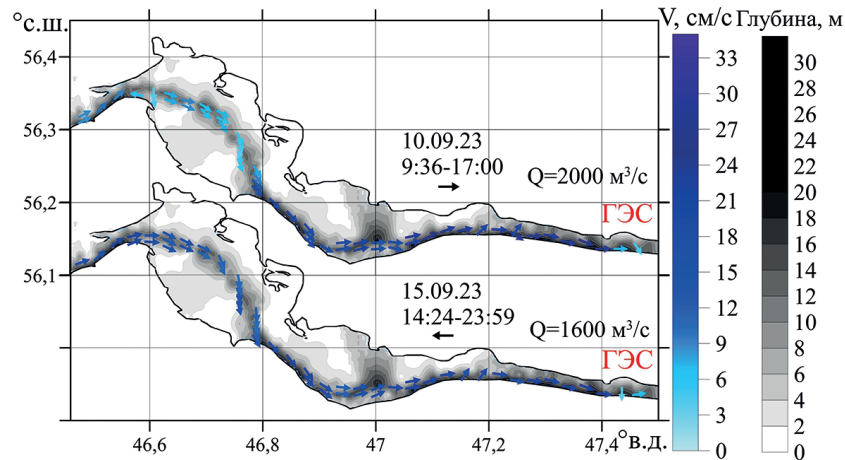


Рис. 6. Векторное поле средних по глубине течений в озерной части Чебоксарского водохранилища над затопленным руслом

Fig. 6. Vector field of depth-averaged currents in the lake part of the Cheboksary reservoir above the flooded channel

3.3. Куйбышевское водохранилище

Аналогично рис. 4, на рис. 7 представлен продольный разрез речной части Куйбышевского водохранилища до слияния Волги с Камой. Скорость течения вдоль судового хода, аналогично Чебоксарскому

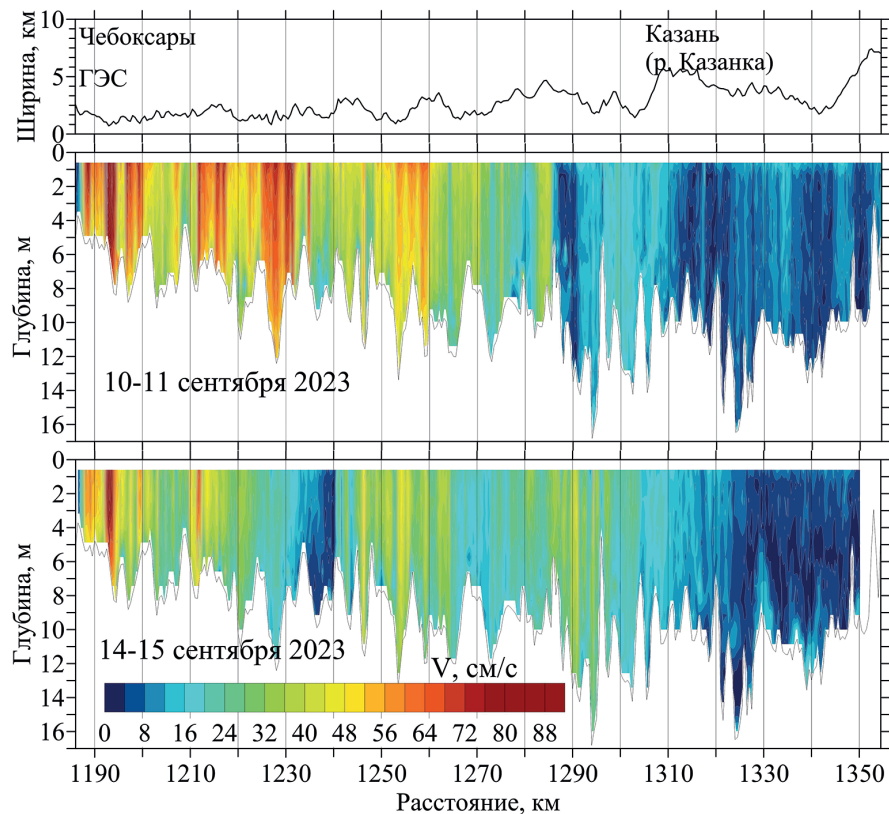


Рис. 7. Продольный разрез Куйбышевского водохранилища от Чебоксарской ГЭС до стрелки Волги и Камы с наложенным цветовым градиентом магнитуды течений. Сверху — примерная ширина реки

Fig. 7. Longitudinal section of the Kuibyshev reservoir from the Cheboksarskaya HPP to the Volga-Kama arrow with superimposed color gradient of current magnitude. Approximate width of the river (above)

водохранилищу, спадает при удалении от плотины Чебоксарской ГЭС. Наибольшая скорость течения более 90 м/с наблюдалась в районе притоков Цивиль, Большая и Малая Кокшага (20–30 км от ГЭС, ширина около 1 км). Ниже скорость потока в речной части Куйбышевского водохранилища падала до 20–40 см/с. Ниже устья р. Казанки (г. Казань) скорость течения уменьшается в среднем до 5 см/с, что, вероятно, связано с влиянием (подпором) р. Камы.

При сравнении между собой скоростей течений вдоль обоих треков, можно видеть, что скорости течения в речной части Куйбышевского водохранилища изменчивы. Приведем временные серии скоростей, измеренных в одной точке и на продольном разрезе Волги. На рис. 8 представлено распределение скорости течения по глубине с течением времени, снизу слева на карте красной точкой отмечена область измерений, снизу справа приведен спектр колебаний скорости с вычетом из сигнала средней скорости. Непрерывные измерения осуществлялись на протяжении 7,5 ч на расстояние около 58 км от Чебоксарской ГЭС. Рис. 8 демонстрирует уменьшение скорости течения с 35 см/с до 6 см/с с 00:53 до 8:02 15 сентября 2023 г. Как можно видеть по цветовому градиенту скоростей, имеют место колебания скоростей (чередование полос разного цвета) с периодами около 25 мин и 5 ч 48 мин согласно спектру (рис. 8).

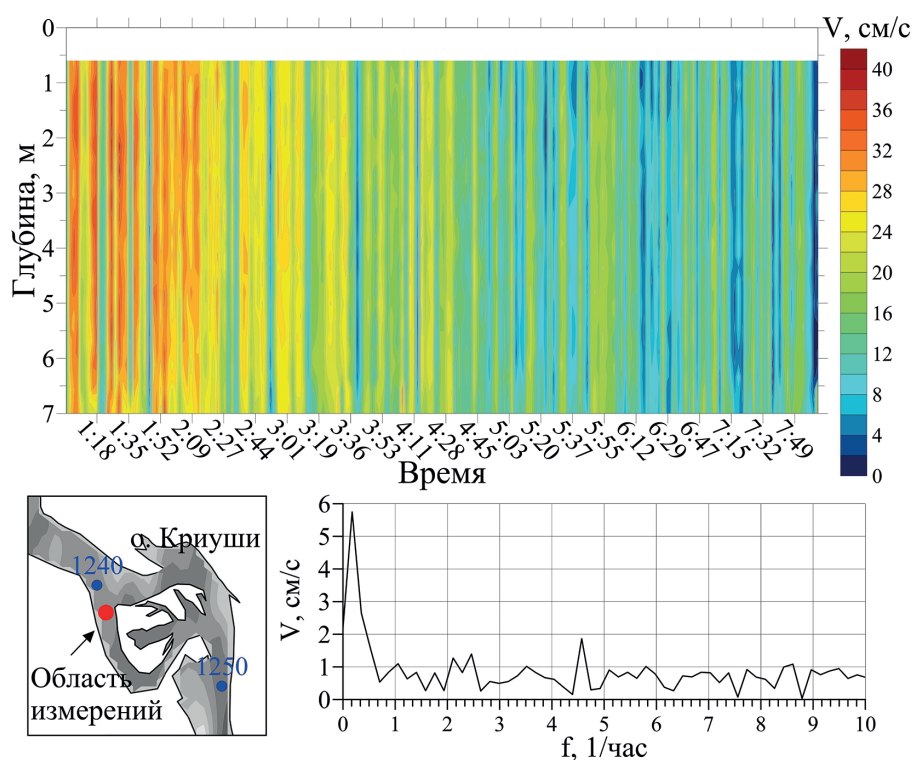


Рис. 8. Измеренные в одной точке временные серии скоростей (сверху); область непрерывных измерений (снизу слева) и спектр колебаний скорости (снизу справа)

Fig. 8. Time series of velocities measured at one point (top), area of continuous measurements (bottom left), and spectrum of velocity fluctuations (bottom right)

На рис. 9. представлен график скорости течений на продольном разрезе Волги около устья р. Казанки на расстояние около 110–128 км от плотины Чебоксарской ГЭС. Измерения проводились в течение одного дня. Разница между магнитудами скоростей составила от 3 до 8 см/с.

Рассмотрим течение около устья р. Камы, что более чем на 200 км выше Жигулевской ГЭС. На рис. 10 представлено векторное поле средних по глубине течений в период с 22 по 28 июля 2023 г и 12–13 сентября 2023 г. Течение в Волге после слияния с Камой усиливается.

Возле правого берега над затопленным руслом Волги до впадения Камы скорость течения составляет 25 см/с, после слияния с Камой скорость течения в русле достигает 30 см/с. Над поймой (менее глубокие области) средняя скорость течений не превышает 6 см/с. Скорости течения в июле и сентябре близки.

Направления течений 28.07 демонстрирует наличие круговорота в устье Камы, при этом 12.09 круговорот не прослеживается, течения направлены из Волги в сторону Камы. Вероятно, это связано с влиянием

комбинации режимов работы Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС: равномерные среднесуточные расходы накануне измерений в июле (Чебоксарская 2260 м³/с и Нижнекамская 1800 м³/с), в сентябре равномерные среднесуточные расходы в Чебоксарской ГЭС (2000 м³/с) и уменьшение среднесуточные расходы через Нижнекамскую ГЭС (2220 м³/с и 660 м³/с) [28].

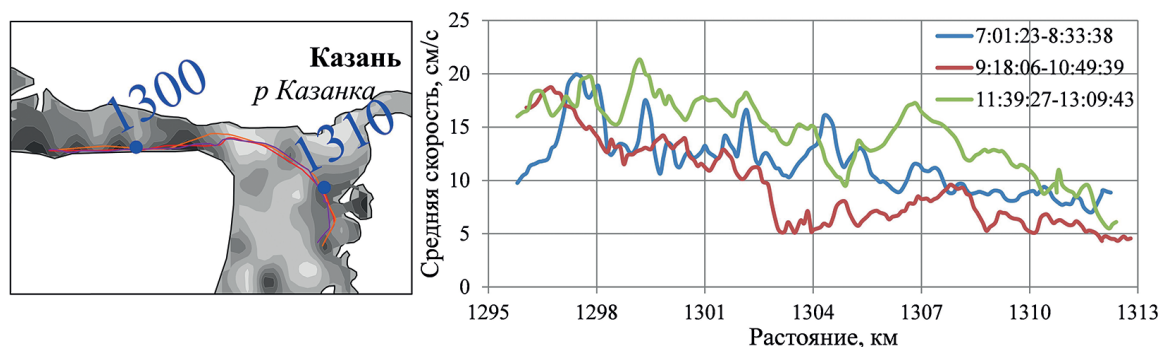


Рис. 9. Скорость течений на продольном разрезе Волги около устья р. Казанки, измеренные в течение одного дня

Fig. 9. Current velocity on the longitudinal section of the Volga River near the mouth of the Kazanka River, measured during one day

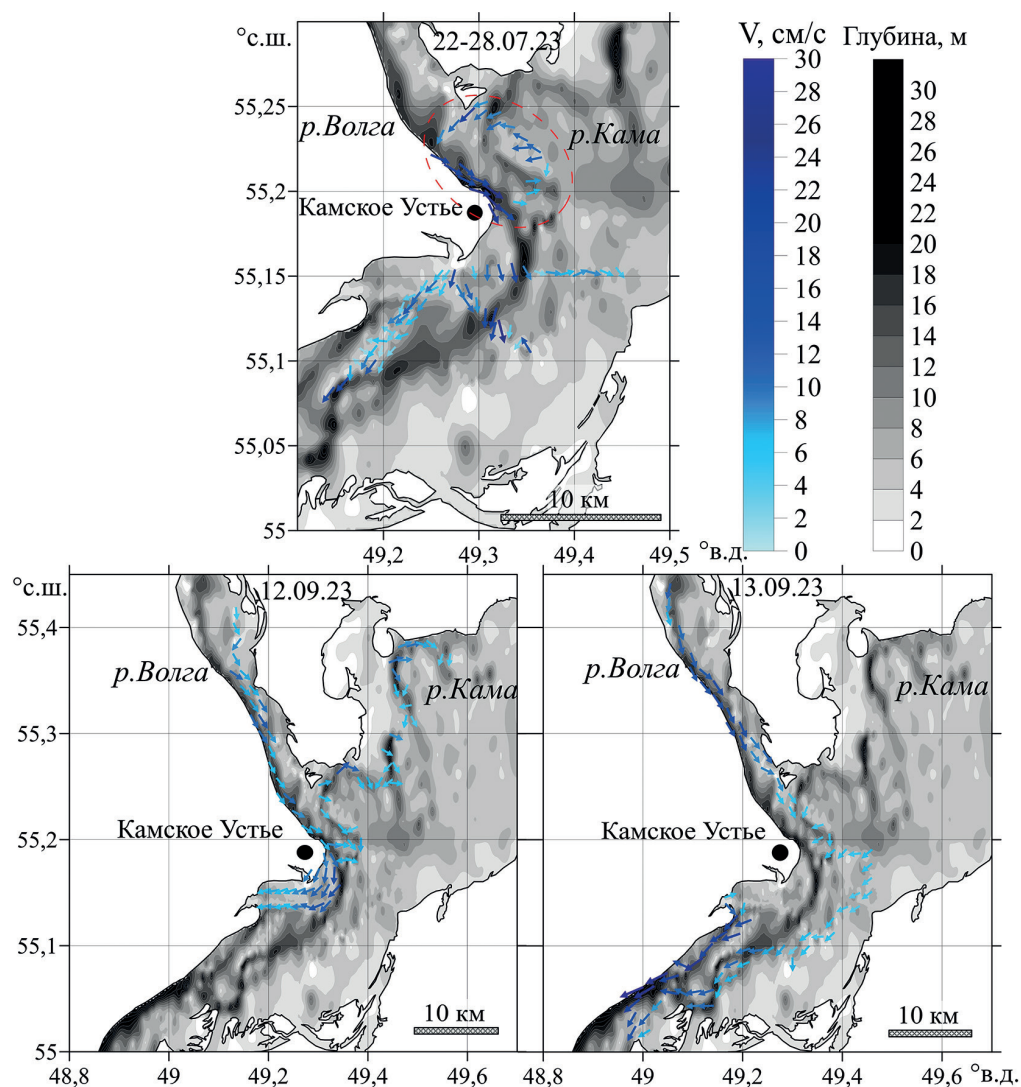


Рис. 10. Векторное поле средних по глубине течений в озерной части Куйбышевского водохранилища в районе слияния Волги и Камы

Fig. 10. Vector field of depth-averaged currents in the lake part of the Kuibyshev reservoir in the area of the Volga-Kama confluence

3.4. Волгоградское водохранилище

Примерное расстояние от Волжской ГЭС до районов, где проводились измерения: 190 км до устья р. Еруслан, 150 км до г. Камышина, 35–40 км до с. Оленье. Согласно серии измерений в 2024 г. течение в исследуемом районе Волгоградского водохранилища имеет русловой/стоковый характер, р. Еруслан не находится в подпоре. На рис. 11 представлены векторные поля течений в Волгоградском водохранилище около р. Еруслан 31.05.24 и 20.08.24, на рис. 12 представлены векторные поля течений в июне (03.06.24 и 05.06.24) и в августе (17.08.24 и 18.08.24) около города Камышин.

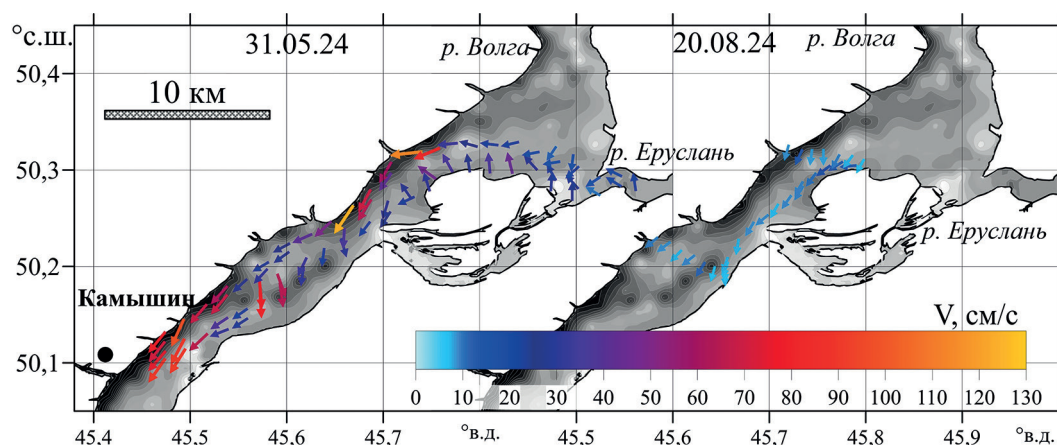


Рис. 11. Векторные поля течений в Волгоградском водохранилище около р. Еруслан 31.05.24 (слева) и 20.08.24 (справа)

Fig. 11. Vector fields of currents in the Volgograd Reservoir near the Eruslan River 31.05.24 (left) and 20.08.24 (right)

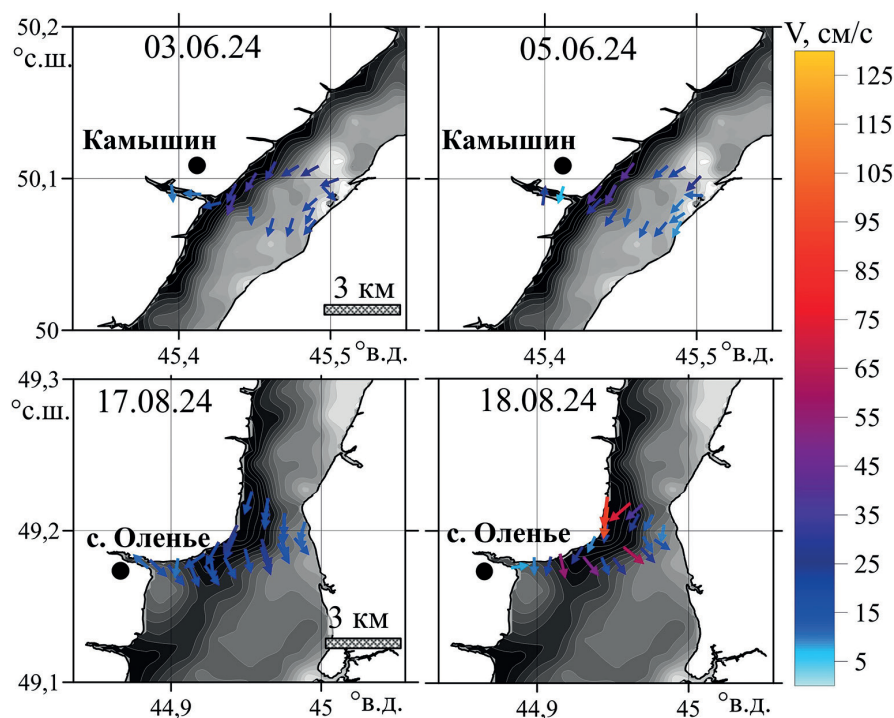


Рис. 12. Векторные поля течений в Волгоградском водохранилище около г. Камышин (верхний ряд) и около с. Оленье (нижний ряд)

Fig. 12. Vector fields of currents in the Volgograd reservoir near Kamyshevo (top row) and near Olenye (bottom row)

Скорости течения над руслом выше скоростей над поймой. При сравнении течений в июне и августе (рис. 11) можно видеть, что магнитуда течений в дни измерений существенно отличается. За счет

увеличенных сбросов в Волжском каскаде ГЭС (среднесуточные значения расхода через Волжскую ГЭС в начале июня около 13500 м³/с, в августе 5500 м³/с [28]), среднее значение скорости течения в конце мая — июне составляют 50–55 см/с. Максимальные скорости над руслом достигают 150 см/с. В августе среднее значение скорости составляет 10–13 см/с, магнитуа течений не превышает 40 м/с в том числе над руслом.

Как можно видеть из рис. 12 магнитуды течений в дни с близкими среднесуточными расходами различаются. Близкое положение к ГЭС приводит к существенным межсуточным изменениям в структуре течений. Сравнивая средние значения скоростей в августе на рис. 11 (справа) и рис. 12 (снизу), можно видеть, что при близких значениях среднесуточных расходов (5500 м³/с и 5550 м³/с) более высокие средние скорости наблюдаются на близком к ГЭС расстоянии около с. Олень (выше г. Дубовки) по сравнению с «верхней» озерной частью у устья Еруслан.

4. Заключение

В ходе экспедиционных работ 2023 г. и 2024 г. с использованием акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) проведены исследования структуры течений в четырех водохранилищах Волжского каскада: Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском, Волгоградском. Измерения проводились на различных удалениях от ГЭС как при движении носителя измерительной аппаратуры так при стационарном размещении измерителя течений в отдельных точках акватории.

На примере измерений в речной части Чебоксарского и Куйбышевского водохранилища показано, что характерной особенностью течения в речной части исследуемых водохранилищ является снижение скорости по мере удаления от плотины ГЭС и при приближении к озерной части водохранилища. При этом влияние суточного регулирования стока ГЭС на изменения скорости в Чебоксарском водохранилище не прослеживается. Участок ниже 53 км от Нижегородской ГЭС характеризуется близкими скоростями не зависимо от расхода в разные дни измерения по данным 2023 и 2019 гг. Скорость течения в Куйбышевском водохранилище до слияния Волги с Камой обладает большей изменчивостью на более длинной дистанции от плотины ГЭС по сравнению с Чебоксарским водохранилищем.

Скорости течения в озерных частях водохранилищ увеличиваются при приближении к ГЭС (Чебоксарское и Волгоградское), при этом в зависимости от режима регулирования стока ГЭС наблюдается высокая изменчивость в пространственной структуре течений. В Волгоградском водохранилище это проявляется в увеличении скорости. В Горьковском водохранилище вблизи плотины Нижегородской ГЭС суточное увеличение стока приводит к усилению руслового течения, последующее уменьшение расхода — к формированию обратного течения над поймой и интенсификации круговорота. Наличие круговорота в районе слияния Волги и Камы в Куйбышевском водохранилище вероятно связано со сложным взаимодействием расходов через Чебоксарскую Нижнекамскую ГЭС.

Настоящую работу следует рассматривать как краткий обзор имеющейся обширной базы данных измерений течений, полученной с использованием ADCP в акватории водохранилищ Волжского каскада. Дальнейший анализ полученных данных будет посвящен детальному исследованию отдельных эффектов, связанных с регулированием стока.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. Влияние неравномерности стока воды через ГЭС на течения проводилось в рамках госзадания FFUF-2024-0033.

Funding

This research was supported by the Russian Science Foundation, No. 23-17-00071 (“Volga Biooptical Algorithms”), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. The influence of uneven water flow through the hydroelectric power station on currents was carried out within the framework of the state task FFUF-2024-0033.

Литература

1. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
2. Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

3. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
4. Goldenfum J.A. Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions // *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2012. Vol. 12, N 2. P. 115–122. doi:10.2478/v10104-012-0011-5
5. Prairie Y.T., Alm J., Beaulieu J. et al. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: what does the atmosphere see? // *Ecosystems*. 2018. Vol. 21. P. 1058–1071. doi:10.1007/s10021-017-0198-9
6. Chen Z., Liu Z., Yin L., Zheng W. Statistical analysis of regional air temperature characteristics before and after dam construction // *Urban Climate*. 2022. Vol. 41. P. 101085. doi:10.1016/j.uclim.2022.101085
7. Iakunin M., Abreu E.F., Canhoto P., Pereira S., Salgado R. Impact of a large artificial lake on regional climate: A typical meteorological year Meso-NH simulation results // *International Journal of Climatology*. 2022. Vol. 42, N 2. P. 1231–1252. doi:10.1002/joc.7299
8. Karadžić V., Subakov-Simić G., Krizmanić J., Natić D. Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia) // *Desalination*. 2010. Vol. 255. P. 91–96. doi:10.1016/j.desal.2010.01.009
9. Genkal S.I., Okhapkin A.G., Vodeneva E.L. Planktonic Centric Diatoms (Bacillariophyta, Coscinodiscaceae) of the Cheboksary Reservoir, Russia // *Inland Water Biol.* 2022. Vol. 15. P. 750–759. doi:10.1134/S1995082922060037
10. Литвинов А.С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами БПВ-2р // *Труды Института биологии внутренних вод Академии наук СССР*. 1968. № 16. С. 259–268.
11. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: водохранилища верхней Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 292 с.
12. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 269 с.
13. Ильина А.А., Никонорова И.В., Ильин В.Н., Никитина Е.А. Гидрологические и экологические проблемы Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ чебоксарского участка Чувашской республики // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 6. С. 34–39. doi:10.17513/use.38050
14. Смирнова М.В., Чебан Е.Ю., Ермаков С.А. и др. Исследования экологического состояния вод участков горьковского и чебоксарского водохранилищ в рамках экспедиции «Плавучий университет Волжского бассейна» 2017 г. // *Труды научного конгресса 20-го Международного научно-промышленного форума «ВЕЛИКИЕ РЕКИ» 2018*, 2018. С. 290–293.
15. Грушевский М.С. Волны пропусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 337 с.
16. Рахуба А.В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // *Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки*. 2020. Т. 162, № 3. С. 430–444. doi:10.26907/2542-064X.2020.3.430-444
17. Рахуба А.В. Динамика водных масс Саратовского водохранилища под влиянием попусков ГЭС // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2008. № 2. С. 55–67.
18. Герасимов Ю.В., Поддубный С.А., Малин М.И., Цветков А.И. Влияние гидродинамических условий на распределение рыб в Чебоксарском водохранилище // *Вопросы рыболовства*. 2014. Т. 15, № 3. С. 295–305.
19. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада. // *Труды Института биологии внутренних вод РАН*. 2018. № 81(84). С. 35–46. doi:10.24411/0320-3557-2018-1-0004
20. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Нестационарный режим водохранилища: опыт моделирования русловых процессов с подвижным дном // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 138–149. doi:10.59887/fpg/peru-3z3h-gazh
21. Паршакова Я.Н., Любимова Т.П., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Численное моделирование влияния неравномерности сброса воды через плотины крупных ГЭС на гидродинамические режимы верхних бьефов гидроузлов // *Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках»*, 2020. С. 91.
22. Гузиватый В.В., Науменко М.А., Румянцев В.А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции // *Исследование Земли из космоса*. 2020. № 1. С. 20–30. doi:10.31857/S0205961420010042
23. Капустин И.А., Мольков А.А., Даниличева О. Аю и др. Определение течений в водохранилище по последовательным внутрисуточным спутниковым изображениям // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2024. Т. 60, № 3. С. 347–356. doi:10.31857/S0002351524030071
24. Капустин И.А., Мольков А.А., Ермошкин А.В. и др. Восстановление структуры течений в Куйбышевском водохранилище с использованием спутниковых данных и натурных измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 1. С. 63–72. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-5
25. Мольков А.А., Капустин И.А., Ермаков С.А. и др. Гидрофизическая лаборатория ИПФ РАН «Геофизик» как эффективный инструмент лимнологического мониторинга // *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения*. Нижний Новгород 8–14 сентября, 2019. С. 214–218.

26. Капустин И.А., Мольков А.А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 110–117.
27. Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M. et al. Investigation of Water Dynamics Nearby Hydroelectric Power Plant of the Gorky Reservoir on Water Environment: Case Study of 2022 // Water. 2023. Vol. 15, N 17. P. 3070. doi:10.3390/w15173070
28. Расходы воды через ГЭС, РусГидро. URL: <https://rushydro.ru/informer/> (дата обращения: 12.10.2024).
29. Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев Г.В. Исследование влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке Горьковского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 242–252. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252
30. Капустин И.А., Ермаков С.А., Смирнова М.В., Вострякова Д.В., Мольков А.А., Чебан Е.Ю., Лещев Г.В. О формировании изолированной линзы речного стока круговоротом в горьковском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 214–221. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221
31. Капустин И.А., Мольков А.А., Ермаков С.А., Смирнова М.В. Общая характеристика и особенности структуры течения в акватории Чебоксарского водохранилища от Нижнего Новгорода до Козьмодемьянска // Труды 4-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна», 2019. С. 17.

References

1. Butorin N.V. Hydrological processes and water mass dynamics in the Volga cascade reservoirs. Leningrad: Nauka; 1969. 322 p. (in Russian).
2. Edelstein K.K. Reservoirs of Russia: Ecological Problems, Ways of Their Solution. GEOS Publishers: Moscow; 1998. 277 p. (in Russian).
3. Reservoirs and their impact on the environment. Moscow: Nauka, 1986. 367 p. (in Russian).
4. Goldenfum J.A. Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions. *Ecology & Hydrobiology*. 2012;12(2):115–122. doi:10.2478/v10104-012-0011-5
5. Prairie Y.T., Alm J., Beaulieu J. et al. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: what does the atmosphere see? *Ecosystems*. 2018;21:1058–1071. doi:10.1007/s10021-017-0198-9
6. Chen Z., Liu Z., Yin, L., Zheng W. Statistical analysis of regional air temperature characteristics before and after dam construction. *Urban Climate*. 2022;41:101085. doi:10.1016/j.uclim.2022.101085
7. Iakunin M., Abreu E.F., Canhoto P., Pereira S., Salgado R. Impact of a large artificial lake on regional climate: A typical meteorological year Meso-NH simulation results. *International Journal of Climatology*. 2022;42(2):1231–1252. doi:10.1002/joc.7299
8. Karadžić V., Subakov-Simić G., Krizmanić J., Natić D. Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia). *Desalination*. 2010;255:91–96. doi:10.1016/j.desal.2010.01.009
9. Genkal S.I., Okhapkin A.G., Vodeneva E.L. Planktonic Centric Diatoms (Bacillariophyta, Coscinodiscaceae) of the Cheboksary Reservoir, Russia. *Inland Water Biol.* 2022;15:750–759. doi:10.1134/S1995082922060037
10. Litvinov A.C. About measurement of currents in reservoirs by EPV-2r recorders. *Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the USSR Academy of Sciences*. 1968;16:259–268 (in Russian).
11. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR: reservoirs of the upper Volga. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 292 p. (in Russian).
12. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. 269 p. (in Russian).
13. Ilina A.A., Nikonorova I.V., Ilin V.N., Nikitina E.A. Hydrological and ecological problems of Cheboksary and Kuibyshev reservoirs of Cheboksary section of the Chuvash republic. *Uspehi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2023;6:34–39. doi:10.17513/use.38050 (in Russian).
14. Smirnova M.V., Cheban E.Y., Ermakov S.A. et al. Studies of the ecological state of the waters of the sites of the Gorky and Cheboksary reservoirs within the expedition “Floating university of the Volga basin” 2017. *Proceedings of the scientific congress of the 20th International Scientific and Industrial Forum “GREAT RIVERS’2018”*. 2018; 290–293 (In Russian).
15. Grushevskii M.S. Waves of skips and floods in rivers. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1969. 337 p. (In Russian).
16. Rakhuba A.V. Assessment of the influence exercised by the hydrodynamic regime on the phytoplankton development and the water quality of the Kuibyshev Reservoir. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2020;162(3):430–444. doi:10.26907/2542-064X.2020.3.430-444 (In Russian).
17. Rakhuba A.V. The Saratov Reservoir water masses dynamics under the hydro power station releases impact. *Vodnoe Hozhajstvo Rossii: Problemy, Tehnologii, Upravlenie*. 2008;2:55–67 (In Russian).

18. Gerasimov Yu.V., Poddubny S.A., Malin M.I., Tsvetkov A.I. The influence of hydrodynamic conditions on fish distribution in cheboksary reservoir. *Problems of Fisheries*. 2014;15(3):295–305 (In Russian).
19. Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in formation of bottom sediments in reservoirs of the Volga — Kama cascade. *Transactions of IBIW RAS*, 2018, 81 (84), 35–46. doi:10.24411/0320-3557-2018-1-0004 (In Russian).
20. Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Regime of Reservoir: Experience in Modeling Riverbed Processes with a Movable Bed. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):138–149. doi:10.59887/fpg/peru-3z3h-gazh (In Russian).
21. Parshakova Y.N., Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Tiunov A.A. Numerical modeling of influence of irregularity of water discharge through the dams of large HPPs on hydrodynamic regimes of the upper embankments of hydroelectric complexes. *Abstracts of XXIX All-Russian School-Conference “Mathematical Modeling in Natural Sciences”*. 2020; 91 (in Russian).
22. Guzivaty V.V., Naumenko M.A., Romyantsev V.A. Estimation of velocity of upper layer of Lake Ladoga by using of Maximum Cross Correlation (MCC) Method. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020;1:20–30. doi:10.31857/S0205961420010042 (in Russian).
23. Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., et al. Determining currents in the reservoir by consequent subdaily satellite images. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60(3):297–305. doi:10.1134/S0001433824700233
24. Kapustin I.A., Molkov A.A., Ermoshkin A.V. Reconstruction of the currents structure in the Kuibyshev Reservoir using satellite data and field measurements. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(1):63–72. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-5 (in Russian).
25. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermakov S.A. Hydrophysical laboratory of IPF RAS “Geofizik” as an effective tool for limnological monitoring. *Scientific problems of improvement of Russian rivers and ways of their solution. Nizhny Novgorod*, 8–14 September 2019, 214–218 (in Russian).
26. Kapustin I.A., Molkov A.A. Structure of currents and depth in the lake part of the Gorky Reservoir. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019;7:110–117 (In Russian).
27. Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M., Dobrokhotova D., Leshchev G., Vodeneeva E., Sharagina E., Kolesnikov A. Investigation of water dynamics nearby hydroelectric power plant of the Gorky Reservoir on water environment: Case study of 2022. *Water*. 2023;15(17):3070. doi:10.3390/w15173070
28. Water flow rates through HPPs, RusHydro URL: <https://rushydro.ru/informer/> (accessed: 12.10.2024).
29. Dobrokhotova D.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Leshchev G.V. A study of the effect of hydropower operation regime on the redistribution of phytoplankton in the upper water layer in the dam section of the Gorki Reservoir. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023;20:242–252. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252 (In Russian).
30. Kapustin I.A., Ermakov S.A., Smirnova M.V., Vostryakova D.V., Molkov A.A., Cheban E. Yu., Leshchev G.V. On the formation of an isolated lens of a river runoff by a whirlpool in the Gorky Reservoir. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021;18(6):214–221. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221 (In Russian).
31. Kapustin I.A., Molkov A.A., Ermakov S.A., Smirnova M.V. General characterization and features of the flow structure in the water area of the Cheboksary reservoir from Nizhny Novgorod to Kozmodemyansk. *Proceedings of the 4th All-Russian Scientific Conference “Problems of ecology of the Volga basin”*. 2019; 17. (In Russian).

Об авторах

- ДОБРОХОТОВА Дарья Васильевна, младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981-2022, SPIN-код (РИНЦ): 9740-3806, e-mail: vostryakova@ipfran.ru
- КАПУСТИН Иван Александрович, заведующий лабораторией ННГУ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593-2014, SPIN-код (РИНЦ): 7060-5757, e-mail: kia@ipfran.ru
- МОЛЬКОВ Александр Андреевич, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-8550-2418, Scopus AuthorID: 55377777800, WoS ResearcherID: A-3623-2014, SPIN-код (РИНЦ): 8959-5235, e-mail: molkov@ipfran.ru
- ЛЕЩЕВ Георгий Владимирович, младший научный сотрудник ННГУ, ORCID: 0000-0001-5574-7935, Scopus AuthorID: 57213165519, SPIN-код (РИНЦ): 5370-0731, e-mail: georgeleshev@ipfran.ru
- ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич, старший научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-6528-7589, Scopus AuthorID: 54410480500, WoS ResearcherID: D-5271-2015, SPIN-код (РИНЦ): 1336-6994, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-9

УДК 913

© М. Г. Гришин¹, А. В. Собисевич^{1,2*}, 2025

¹Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 14

²Российский государственный гуманитарный университет, 125047, Москва, Миусская пл., д. 6

*sobisevich@mail.ru

УЧАСТИЕ СОВЕТСКИХ УЧЁНЫХ В ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, ПРОВОДИМЫХ В РАМКАХ МЕРОПРИЯТИЙ МЕЖДУНАРОДНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ГОДА (1957–1958 ГГ.)

Статья поступила в редакцию 21.10.2024, после доработки 03.03.2025, принята в печать 06.03.2025

Аннотация

Международный геофизический год, проводившийся в 1957–1958 гг., стал важным мероприятием для проведения гидрофизических наблюдений Мирового океана. Успешное участие советских учёных в его мероприятиях стало возможным благодаря государственной поддержке научно-исследовательских институтов, экспедициям научно-исследовательских судов, закупке и производству необходимого оборудования. Наибольший вклад внесли применяемые в исследованиях НИС «Михаил Ломоносов» и «Витязь». Были уточнены структура океанических течений, причины возникновения цунами и другие вопросы морской гидрофизики. Важным было также то, что советские учёные привлекали к исследованиям учёных из стран Совета экономической взаимопомощи и других дружественных стран.

Ключевые слова: международный геофизический год, гидрофизические наблюдения, гидрофизика, геология морского дна, морские течения

© М. Г. Grishin¹, A. V. Sobisevich^{1,2*}, 2025

¹S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, 14 Baltiyskaya Str., Moscow 125315, Russia

²Russian State University for the Humanities, 6 Miusskaya sq., Moscow 125047, Russia

*sobisevich@mail.ru

SOVIET SCIENTISTS' PARTICIPATION IN HYDROPHYSICAL RESEARCH CONDUCTED AS PART OF THE EVENTS OF THE INTERNATIONAL GEOPHYSICAL YEAR (1957–1958)

Received 21.10.2024, Revised 03.03.2025, Accepted 06.03.2025

Abstract

The International Geophysical Year, held in 1957–1958, became an important event for conducting hydrophysical observations of the world ocean. Successful participation of Soviet scientists in its events became possible due to state support for research institutes, direction for research of research vessels, purchase and production of necessary equipment. The greatest contribution was made by the research vessels “Mikhail Lomonosov” and “Vityaz” used in the research. Deep-sea vehicles, sea buoys, space satellites were widely used in the research, which made it possible to clarify the nature of sea currents, causes of tsunamis and other issues of marine hydrophysics. It was also important that Soviet scientists attracted scientists from the countries of the Council for Mutual Economic Assistance and other friendly countries to the research.

Key words: International Geophysical Year, hydrophysical observations, hydrophysics, seabed geology, sea currents

1. Введение

Международный геофизический год (МГГ), проводившийся в 1957–1958 гг., стал важным научным мероприятием, который способствовал установлению связей между учёными из разных стран. Мероприятия МГГ проводились в годы международного противостояния Советского Союза со странами Запада, что

Ссылка для цитирования: Гришин М.Г., Собисевич А.В. Участие советских учёных в гидрофизических исследованиях, проводимых в рамках мероприятий Международного геофизического года (1957–1958 гг.) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 106–120. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-9

For citation: Grishin M.G., Sobisevich A.V. Soviet Scientists' Participation in Hydrophysical Research Conducted as Part of the Events of the International Geophysical Year (1957–1958). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):106–120. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-9

приводило к недоверию между учёными из противостоящих стран и стремлению ограничить обмен данными, которые могли бы иметь стратегическое значение. К таким стратегически важным данным относились многие направления геофизических наук, в том числе и по океанологии. Вместе с тем, проведение советскими учёными в ходе МГГ множества морских экспедиций по сбору данных о состоянии океанов имело большое значение для изучения таких явлений как проявления климатической цикличности.

Выработка программы исследований в рамках МГГ проводилась посредством участия в конгрессах и симпозиумах, где согласовывались позиции учёных, представляющих разные страны. Перед началом наблюдений перед учёными вставала проблема сбора, систематизации и хранения собранного массива данных. Для этого создавались мировые центры хранения данных, которые продолжили свою работу после проведения МГГ и позволили учёным всего мира получать доступ к хранимой информации.

Данные Архива Российской академии наук, Российского государственного архива новейшей истории, Архива Президента Российской Федерации и научных фондов Морского гидрофизического института позволяют ввести в научный оборот новые сведения об участии советских научных учреждений в Международном геофизическом году. Эти сведения касаются участия советских учёных и научных учреждений в международных совещаниях, подготовке к океанологическим экспедициям, основных результатов океанологических экспедиций.

2. Подготовка к участию в МГГ

Первое приглашение участвовать в мероприятиях МГГ пришло в Президиум Академии наук СССР от британского астрофизика, профессора Ф. Дж. М. Стрэттона письмом от 8 сентября 1952 г. В приглашении сообщалось, что в 1957–1958 гг. Международный совет научных союзов планирует провести Международный полярный год и подчеркивалось, что присоединение советских учёных к планируемым исследованиям будет иметь большое значение для его полноценного завершения. Стрэттон обратился к Академии наук СССР с просьбой рассмотреть вопрос о создании Национального комитета, который принял бы участие в подготовке к Полярному году. К письму прилагался предварительный набросок программы предстоящих исследований. Океанологических (по международной терминологии — океанографических) исследований в программе не было, однако предполагалось, что программа может быть скорректирована в зависимости от предположений международных научных союзов и национальных комитетов стран-участниц [1, л. 9–11].

29 июля 1953 г. поступило второе приглашение от британского геофизика, председателя Специального Комитета по проведению Международного геофизического года (далее — СК МГГ) Сиднея Чэпмэна Президенту АН СССР А. Н. Несмеянову с предложением принять участие в подготовке и проведении МГГ. Британский учёный полагал, что результаты, полученные в ходе мероприятий МГГ, будут неполноценными без участия советских институтов и обсерваторий. Тот факт, что Советский Союз пока не входил в Международный совет научных союзов, не представлял препятствия для участия в работах МГГ. Советские учёные могли принять участие в исследованиях как представители Всемирной Метеорологической организации. Подготовка ответа для Президиума АН СССР о целесообразности советского участия в мероприятиях МГГ была поручена директору Морского гидрофизического института АН СССР (далее — МГИ) В. В. Шулейкину. Свои соображения он должен был изложить главному учёному секретарю Президиума АН СССР А. В. Топчиеву [1, л. 16–19].

Третье письмо с приглашением участвовать в работах МГГ поступило в Академию наук СССР от президента СК МГГ С. Чэпмэна, вице-президента СК МГГ Л. В. Беркнера и генерального секретаря СК МГГ М. Николе. В письме отмечалось, что МГГ, который планировалось провести с 1 июля 1957 г. до конца 1958 г., будет включать интенсивные наблюдения во всех областях геофизики и таких смежных наук как метеорология, геомагнетизм, геодезия, ионосферная физика, гляциология и океанография (океанология). Руководство СК МГГ предлагало создать национальный комитет для подготовки Советского Союза к участию в мероприятиях МГГ. В Специальном комитете по подготовке к МГГ для представителей СССР были выделены два места, которые заняли член-корреспондент Академии наук СССР А. М. Обухов и заместитель начальника Главного управления Гидрометеорологической службы Ф. Ф. Давитая [1, л. 56–57, 105].

2 августа 1954 г. постановлением Президиума АН СССР был создан Межведомственный комитет по подготовке и проведению научных мероприятий, связанных с МГГ (в настоящее время — Геофизический центр РАН), его председателем назначили директора Геофизического института Г. А. Гамбурцева¹,

¹ В 1955 г. после кончины Г. А. Гамбурцева Межведомственный комитет по подготовке к МГГ возглавил вице-президент АН СССР И. П. Бардин.

а заместителями — членов-корреспондентов АН СССР В.В. Белоусова и Ю.Д. Буланже, профессора Н.В. Пушкина и академика АН Грузинской ССР Ф.Ф. Давитая. В октябре 1954 г. Президиумом АН СССР было утверждено положение о Межведомственном комитете по обеспечению участия в МГГ. На комитет возлагалось составление планов и программ научных исследований в ходе МГГ, координация научно-исследовательских работ, согласование планов публикации результатов научных исследований. Комитет имел право представлять от имени СССР в международных организациях [1, л. 40–42, 106; 2].

Большое значение для участия советских учёных в наблюдениях по программе МГГ имела работа их представителей в международных совещаниях, где обсуждалась программа предстоящих наблюдений. Так, например, 19 августа 1954 г. генеральный секретарь СК МГГ Марсель Николе сообщил президенту АН СССР А.Н. Несмеянову о желании провести в г. Рим с 30 сентября по 4 октября 1954 г. сессию Специального комитета Международного совета научных союзов. На этой сессии должна была обсуждаться программа предстоящих наблюдений в рамках МГГ, которая включала бы такие научные направления как мировые дни², метеорология, геомагнетизм, исследования зари и ночного сияния, ионосферы, солнечной активности, космических лучей, гляциологии и океанографии [1, л. 31, 44].

Советская делегация известила Специальный комитет о решении Академии наук СССР принять участие в МГГ и о желании включить в его программу изучение сейсмологии, гравиметрии³ и теллурических токов⁴. Специальному комитету МГГ было сообщено о том, что СССР предусматривает проведение в период МГГ геофизических наблюдений на своей территории и проведение экспедиций и организацию комплексных геофизических станций в Арктике, Антарктике, в районах экватора и на островах океанов как самостоятельно, так и в сотрудничестве с другими странами. Конкретный план участия СССР в МГГ ещё составлялся и не мог быть доложен [1, л. 27].

3. Обсуждение участия в исследованиях по океанологии и морской метеорологии

Участие советской делегации в работе различных научных групп по основным разделам геофизики обсуждалось на совещании Специального комитета, посвященном согласованию и утверждению научных программ Геофизического года, с 8 по 14 сентября 1955 г. в г. Брюсселе (Бельгия). Внимание, которое уделялась обсуждению тем, связанных с океанологией, подчеркивалось участием в делегации директора Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР В.Г. Корта [1, л. 200].

Советских учёных интересовали также такие частные вопросы океанологии, как взаимодействие океана и атмосферы. В сентябре 1955 г., перед собранием океанографов под эгидой ЮНЕСКО в г. Токио, японские учёные обсудили с представителями США и СССР проведение съёмок полярного фронта⁵ в северной части Тихого океана. Первоначальный план СССР предусматривал проведение четырех циклов наблюдений в северной части Тихого океана в течение 18 месяцев МГГ. В ходе переговоров участники из СССР согласились уступить два цикла наблюдений, расширив таким образом участие Японии в съёмках. Съёмки должны были проводиться в северной части Тихого океана к западу от международной линии перемены дат: дважды СССР (в июле 1957 г. и в феврале 1958 г.) и дважды Японией (в октябре–ноябре 1957 г. и августе–сентябре 1958 г.) [1, л. 65].

Вопросы проведения исследований в области океанологии обсуждались в конце мая 1956 г. во время регионального совещания по Арктике, которое проходило в Стокгольме. Во встрече приняли участие представители Великобритании, Бельгии, Дании, Исландии, Канады, Норвегии, Польши, СССР, США, Финляндии, Франции, ФРГ и Швеции. Результатом обсуждения стало создание рабочих групп, которые отвечали за научно-исследовательские работы в сфере метеорологии, земного магнетизма, гляциологии, океанографии, гравиметрии, сейсмологии, изучения полярных сияний, ионосферы, солнечной активности, космических лучей и других наук [3, с. 55]. По океанографии рабочую группу возглавил профессор В.Г. Корт [4, л. 1]. Участниками совещания также планировалась организация четырех дрейфующих научных станций в Арктике: две из них создавались силами СССР и еще две — США.

² Мировые дни — периоды, когда геофизики с большей частотой и интенсивностью проводят свои наблюдения. Сигналом к дополнительным наблюдениям становятся солнечная вспышка или магнитная буря, предстоящее солнечное затмение или внезапное изменение температуры в стратосфере.

³ Имеется в виду изучение пространственно-временного распределения силы тяжести.

⁴ Теллурические токи — электрические токи, которые текут по поверхности Земли.

⁵ Полярный фронт — атмосферный фронт, разделяющий умеренные и тропические воздушные массы.

С 30 июля по 3 августа 1956 г. в Париже проходила Третья антарктическая региональная конференция, её участниками были делегаты из Австрии, Англии, Аргентины, Новой Зеландии, Норвегии, СССР, США, Франции, Южно-Африканского Союза и Японии. Центральное место в работе конференции занимали вопросы координации исследований и выработка мер по оказанию взаимопомощи в экспедициях. Большое внимание участников было уделено созданию метеорологической сети в южных морях. Конференцией была принята рекомендация об организации наблюдений на неподвижных или подвижных кораблях, в частности с судна, которое двигалось бы вокруг Земли между 45° и 55° южной широты. Группой по координации исследований был рассмотрен вопрос об организации международной метеорологической станции на острове Буве, которая должна была явиться связующей точкой между африканским континентом и Антарктидой. При помощи гидрографического судна «Лена» планировалось провести обследование острова Буве, чтобы принять решение о возможности постройки научной станции [3, с. 56–57].

С 20 по 25 августа 1956 г. в Москве проходило региональное совещание МГГ, где советские учёные предложили к осуществлению программу сравнений приборов, предназначенных для магнитных наблюдений, при помощи немагнитного судна «Заря». В рекомендациях программы по разделу «океанология» содержалось обращение к национальному комитету Германской Демократической Республики (ГДР) о возможном привлечении её научных учреждений к исследованиям в северной части Атлантического океана на советских судах и об организации комплексного изучения центральной части Средиземного и Адриатического морей [5, л. 21, 24–29; 3, с. 57].

6 октября 1956 г. академику И.П. Бардину было направлено письмо председателя японского национального комитета по участию в МГГ М. Хасегавы, приглашающее прислать делегатов для участия в региональной конференции по МГГ в Токио. В конференции, в которой предполагалось участие представителей 11-ти стран, должна была рассматриваться организация научно-исследовательских работ в западной части Тихого океана. Советские учёные были очень заинтересованы в участии по программе МГГ в геофизических исследованиях на Дальнем Востоке и в Тихом океане. Помимо наблюдений, проводимых геофизическими станциями в Приморье, на Сахалине, на Камчатке и на Северо-Востоке Азиатской части СССР, программа советских работ включала океанографические исследования в Тихом океане и сейсмические изыскания в зоне перехода от Азиатского материка к океану [6, л. 1–2, 5; 7, л. 141–142].

Дополнительное приглашение от 14 декабря 1956 г. принять участие в региональной конференции в г. Токио с 25 февраля по 2 марта 1957 г. поступило в Национальный комитет МГГ Советского Союза. На конференции должна была обсуждаться в составе общих вопросов окончательная координация сети наблюдений в западной части Тихого океана. В составе вопросов по дисциплинам должны были обсуждаться периоды, районы и распределение станций международных океанографических наблюдений. Приглашение было разослано Национальным комитетам по МГГ Австралии, Великобритании (Гонг-Конга и Сингапура), Индии, Индонезии, Нидерландов (Голландии), Новой Зеландии, Пакистана, Народной Республики Китая, Филиппинской Республики, США и СССР [6, л. 18; 7, л. 146–147.].

Советских учёных интересовала проблема цунами в дальневосточных регионах, поэтому рассматривался вопрос о командировке нескольких специалистов для обмена опытом в одну из стран, наиболее близких по геологической природе с Курило-Камчатской зоной. Академией наук СССР также разрабатывались вопросы по научному обоснованию проблемы и по созданию службы цунами на Камчатке и Курильских островах. В составе советской делегации на Региональную конференцию в Японию были командированы заместитель председателя Межведомственного комитета по МГГ В.В. Белоусов, председатель Совета по сейсмологии при Президиуме АН СССР Е.Ф. Саваренский и член рабочей группы по ионосфере Межведомственного комитета по МГГ Н.В. Медникова [6, л. 22–23, 27].

В выписке из отчёта советской делегации о поездке в Японию на Региональную конференцию были кратко обобщены рекомендации по дисциплинам, по которым планировалось провести исследования во время МГГ. Относительно океанографии была выработана рекомендация об обмене специалистами между странами, о дополнительных наблюдениях за волнами с кораблей и островов [6, л. 44]. Международная программа океанографических исследований в итоге включала в себя регистрацию длинных волн и уровня моря, изучение циркуляции глубоких вод, съёмку полярных фронтов и измерение течений с нескольких кораблей.

4. Подготовка программы океанологических исследований СССР

На заседании Президиума Академии наук СССР 2 ноября 1956 г. с докладом о деятельности Межведомственного комитета по подготовке и проведению Международного геофизического года выступил академик И.П. Бардин. Докладчик отмечал, что успешное проведение Международного геофизического

года является важнейшей и первоочередной задачей научных учреждений СССР, также он заметил, что Межведомственным комитетом была проведена большая работа по координации деятельности научных учреждений СССР, по составлению программы участия СССР в исследованиях МГГ и согласованию её с международными организациями, по решению вопросов материального обеспечения исследований. Было принято постановление Президиума АН СССР поручить Бюро Отделений физико-математических наук и геолого-географических наук рассмотреть планы учреждений-участников МГГ с точки зрения переключения научных сотрудников с выполняемых ими научных тем на тематику, непосредственно связанную с МГГ. Совет по антарктическим исследованиям был выведен из Отделения геолого-географических наук и передан в ведение Межведомственного комитета [8, л. 76–77, 79, 82].

В Советском Союзе подготовка и проведение научных исследований по программе МГГ осуществлялись Академией наук СССР в лице нескольких институтов (Геофизического института, Института океанологии им. П.П. Ширшова, Морского гидрофизического института (МГИ), Института географии, Физического института), Главным управлением гидрометеослужбы при Совете Министров СССР, Главным управлением Северного морского пути Министерства морского флота, Министерством связи, Министерством геологии и охраны недр, Центральным институтом прогнозов, Главной геофизической обсерваторией, Арктическим научно-исследовательским институтом (преобразованным позже в Арктический и Антарктический НИИ), Московским, Ленинградским, Киевским, Томским и другими университетами, Всесоюзным НИИ рыбного хозяйства и океанографии, Полярным и Тихоокеанским институтами рыбного хозяйства и океанографии, Пулковской и Крымской обсерваториями и многими другими научными учреждениями. Всего участвовали 16 ведомств и более 100 научных и других учреждений [9, с. 25–26; 3, с. 59]. Один лишь далеко не полный перечень организаций даёт представление о масштабе предстоявших исследований.

Участие СССР в МГГ стало серьезным стимулом для строительства новых научных судов. Одним из таких явилось НИС «Михаил Ломоносов», которое стало первым крупнотоннажным судном, построенным специально для научных исследований по заказу Академии наук СССР. НИС «Михаил Ломоносов» строилось в ГДР на судостроительном заводе «Нептун-верфь», и 3 ноября 1956 г. его корпус был спущен на воду.

В национальной программе океанологических исследований СССР [10, л. 24–25] планировалось изучение океанов и морей: Атлантического, Тихого, Северного Ледовитого и вокруг Антарктиды. Исследования намечалось проводить с помощью шести больших и нескольких маленьких судов. Научно-исследовательское судно «Витязь» Института океанологии им. П.П. Ширшова должно было провести комплексные исследования в Тихом океане, НИС «Океан» Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института — в северо-западной части Тихого океана; гидрографическое судно Балтийского флота «Экватор»⁶, НИС «Севастополь» Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии, НИС «Михаил Ломоносов» Морского гидрофизического института должны были провести комплексные исследования в северной части Атлантического океана; дизель-электроход «Обь» — исследовать воды Антарктики. В национальную программу океанологических исследований входили разделы: геология (рельеф морского дна, морские осадочные отложения, дно моря), физика водных масс (температура, течения, волнения, лёд, солёность), химия воды и биология (планктон, бентос и ихтиология).

В программу было внесено положение о том, чтобы в течение Геофизического года области, разделённые на ряд секторов в северной части Атлантического океана, в Беринговом море, Баренцевом море, Норвежском и Гренландском морях исследовались по четыре раза, в Тихом океане — по два раза, в Антарктиде — по три раза в течение летнего периода. Кроме того, на береговых станциях планировалось изучать уровень моря и длину волн. Наблюдения за уровнем океана и моря на многих станциях позволили бы получить обобщение данных об изменении уровня Мирового океана. Наблюдения за уровнем моря должны были проводиться с помощью регистраторов приливов, а длинные волны должны были исследоваться с помощью специальных регистраторов уровня моря. Наблюдения за уровнем моря сопровождались метеорологическими наблюдениями (ветер, давление) и наблюдениями за вертикальным распределением температуры и солёности (до глубины 1000 м — насколько это было бы возможно). Наблюдения с научно-исследовательских судов по плану состояли, в том числе — в исследовании глубинных течений до 600 м глубины в нескольких полигонах со сторонами, равными 600 миль.

В совещаниях по организации экспедиционных работ в Атлантическом океане принимали участие сотрудники Морского гидрофизического института: академик В.В. Шулейкин, профессор Б.П. Орлов, профессор А.Г. Колесников и доктор физико-математических наук А.М. Гусев [11, л. 25]. Была образована

⁶ Судно «Экватор» ранее являлось немецким океанографическим судном «Метеор», с которого впервые в мировой практике были проведены исследования морского дна с помощью сонара (эхолота).

Межведомственная атлантическая экспедиция, в состав которой вошли суда «Экватор», «Севастополь», «Михаил Ломоносов» и другие. Начальниками межведомственных экспедиций стали: по Тихому океану — А.Д. Добровольский, по Атлантическому — В.В. Шулейкин, по Арктическим морям — В.В. Фролов, по Антарктике — В.Г. Корт [12, с. 23; 13, с. 372]. Экспедиционный план исследований на НИС «Михаил Ломоносов» был поставлен на обсуждение и одобрен рабочей группой по океанографии Межведомственного комитета по проведению МГГ. Предполагалось совершить 7 экспедиционных рейсов НИС «Михаил Ломоносов» с большим числом станций в течение 1957–1958 гг. [4, л. 88, 136; 14, л. 36].

В феврале-марте 1957 г. в Отделе науки, вузов и школ ЦК КПСС обсуждалась возможность участия учёных ГДР в океанографических исследованиях на НИС «Михаил Ломоносов». Президиум АН СССР и Межведомственный комитет по МГГ решили целесообразным предоставить группе учёных ГДР численностью в 5–6 человек возможность участвовать в 1958 г. в работах на научно-исследовательском судне «Михаил Ломоносов», которое собиралось проводить океанографические исследования в Атлантическом океане по программе МГГ. Немецкие учёные должны были прибыть на судно со своим научным оборудованием, в том числе с рядом новых приборов, представлявших интерес для советских учёных [15, л. 32–38].

5. Экспедиции НИС «Михаил Ломоносов» в Атлантическом океане

1 ноября 1957 г. издаётся распоряжение Президиума АН СССР, которым Морскому гидрофизическому институту разрешалось провести с 30 октября до 10 декабря 1957 г. первый экспедиционный рейс на НИС «Михаил Ломоносов» в Атлантическом океане с заходом в г. Росток [16, л. 56]. Рейс НИС «Михаил Ломоносов» проходил с 1 ноября по 28 декабря 1957 г. Наиболее важной задачей было изучение сезонной изменчивости Северо-Атлантического течения и определение закономерности формирования фронтальных зон, взаимодействия тёплых вод Центральной Атлантики и более холодных вод северо-западного района Северной Атлантики [17, с. 112; 18, л. 9]. Планировалось изучение процессов зимней вертикальной циркуляции водных масс, основных струй течений в зонах их схождения. Начальником экспедиции был назначен доктор физико-математических наук А.А. Иванов.

Целью экспедиции было выяснение роли Гольфстрима в образовании общей циркуляции вод Северной Атлантики. Особым разделом работ было проведение стандартных наблюдений до дна океана не только для получения данных о глубинных водных массах, но и для разрешения проблемы сброса отходов атомной промышленности в океан [17, с. 113]. Отличительной особенностью намечаемых исследований должно было стать то, что вести их собирались не при помощи математических вычислений, как это делалось до того времени, а с помощью прямых инструментальных измерений [18, л. 10].

В экспедиции приняли участие 60 научных и научно-технических сотрудников Морского гидрофизического института, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, научных учреждений Гидрометеослужбы, Института океанологии им. П.П. Ширшова и других научно-исследовательских институтов, а также шесть учёных из ГДР [19, с. 5]. Из состава участников экспедиции было организовано 11 отрядов и групп, в том числе и отряд «теории и прочности корабля», в задачу которого входило изучить поведение судна на волне и его мореходные качества [20, с. 31]. Плавание проходило в трудных осенне-зимних штормовых условиях. Были проведены океанологические исследования на 51 дрейфовой станции на двух стандартных разрезах: первый — от Гебридских островов на северо-запад до Исландии, второй — от Исландии к Ирландии [18, л. 120; 21, л. 11].

В ходе 1-го рейса исследования проводились в области полярного фронта и в зоне взаимодействия теплых и холодных водных масс. В результате было установлено, что воды Северо-Атлантического течения характеризуются повышенным содержанием тепла в момент измерений по сравнению с усреднёнными данными многолетних наблюдений [17, с. 116–117]. В придонных горизонтах северного разреза был обнаружен слой воды с отрицательными температурами, свидетельствующими о вхождении арктических глубинных вод из Норвежского и Гренландского морей. Анализ водных масс показал, что верхняя толща занята атлантическими поверхностными водами, пополнение которых осуществляется течениями системы Гольфстрима. Геологи грунтовыми трубками и дночерпателями брали пробы грунта со дна океана (рис. 1); максимальная длина поднятой со дна колонки, взятой 7-метровой трубкой, достигала 382 см [21, л. 94]. По данным эхолотного промера были составлены профили дна и проведена геоморфологическая интерпретация данных по рельефу [20, с. 32]. Специальными приборами были замерены высоты и длины океанских волн, достигавших во время штормов высоты 10 м [14, л. 94]. Ранее научно-исследовательские учреждения СССР не вели систематических исследований в Атлантическом океане. По этой причине им приходилось пользоваться иностранными данными, часто устаревшими и неполными [18, л. 10].

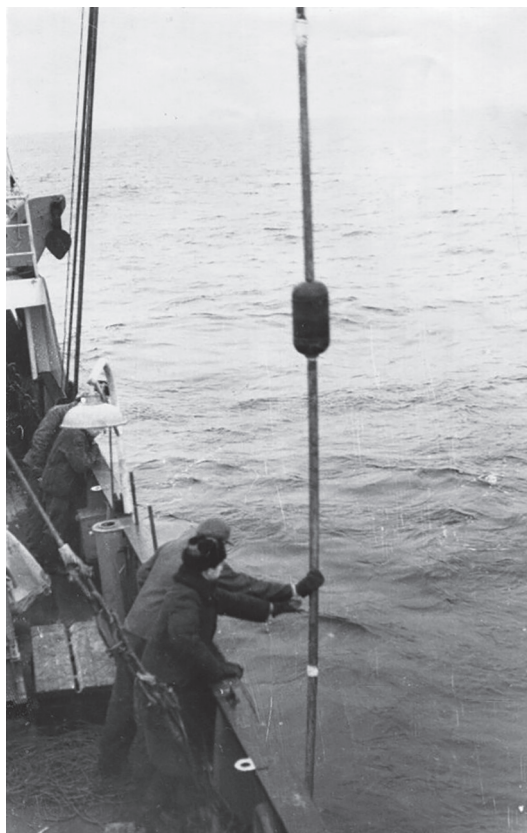


Рис. 1. Работа с геологической трубкой. 1-й рейс НИС «Михаил Ломоносов», 1957. [Научные фонды МГИ. Отчёт о работах в I рейсе э/с «Михаил Ломоносов» 23 сентября — 26 декабря 1957 года. Инв. № 115–123. л. 340]

Fig. 1. Working with a geological tube. 1st flight of the NIS “Mikhail Lomonosov”, 1957. [MHI Scientific Foundations. Report on the work in the First flight of the “Mikhail Lomonosov” on September 23 — December 26, 1957. Inv. No. 115–123. l. 340]

На 1958 г. планом МГГ было намечено изучение таких проблем, как: ветровое волнение Северной Атлантики, вертикальный турбулентный обмен тепла в верхнем слое моря и придном слое атмосферы, циркуляция вод Атлантического океана, распределение химических элементов в водах Атлантического океана и др. [21, л. 2–3]

2-й рейс НИС «Михаил Ломоносов» проходил с 18 февраля по 15 июня 1958 г. [22–24]. Поставленные задачи включали в себя решение научных проблем как по плану МГГ, так и выдвинутых Институтом и другими научно-исследовательскими учреждениями. Основной целью рейса стало проведение более детальных исследований в Северной Атлантике на стандартных маршрутах плана МГГ. В задачи экспедиции входили измерения течений и других гидрологических элементов Атлантического океана для выделения водных масс и определе-

ния особенностей поверхностной и глубинной циркуляции вод океана [22, л. 2, 5] (рис. 2, 3).

Планировалась регистрация всех элементов ветровых волн на ходу судна по проблеме № 9 плана МГГ «Характеристика элементов волн в океанах». Эхолотный промер по всему маршруту должен был производиться в развитие проблемы № 12 плана МГГ «Изучение рельефа океанического дна и его структуры» для уточнения батиметрических карт и корректуры существующих навигационных карт, также по собственному плану МГИ учёных интересовало «Влияние рельефа Северной Атлантики на течения». Программа включала и исследования теллурических токов в океане, согласно проблеме № 23 плана МГГ «Изучение магнитного поля Земли на океанах» [22, л. 7; 25, л. 4].



Рис. 2. Работа сотрудника отряда гидрологии с батометром [25]

Fig. 2. Operation of the hydrology team with a bathometer [25]

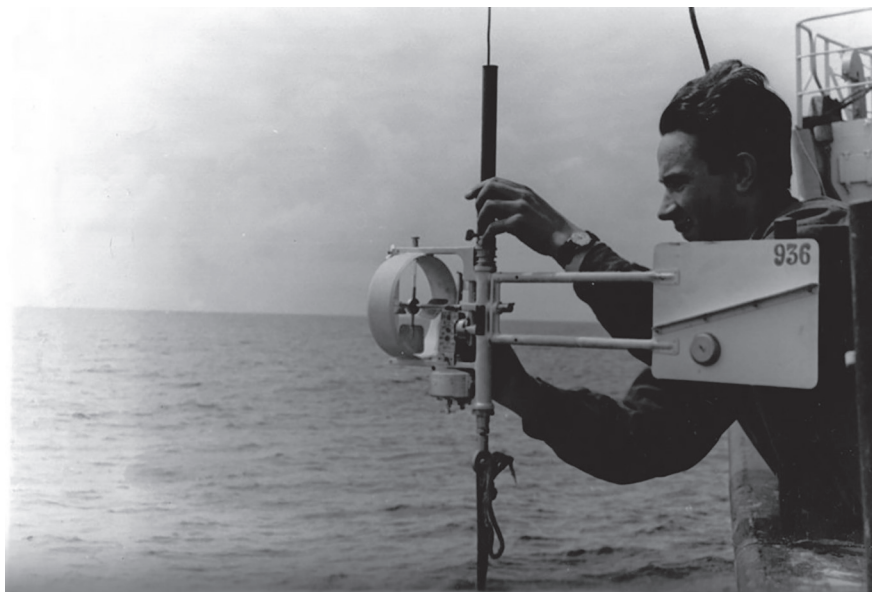


Рис. 3. Работа отряда гидрологии с вертушкой для записи направления и скорости течения [25]

Fig. 3. Operation of the hydrology team with a turntable for recording the direction and speed of the current [25]

Кроме указанных задач, в экспедиционный план входили темы, не предусмотренные программой МГГ, такие как: измерение радиоактивного загрязнения и оптических характеристик вод океана, изучение атмосферных процессов над Северной Атлантикой, влияния зоо- и фитопланктона на распространение света и звука в океане, прочности и мореходности судна [22, л. 7–8; 25, л. 4–5].

Во 2-м рейсе исследования были распространены на широкую акваторию Северной Атлантики, которая была покрыта сеткой разрезов длиной более 1000 миль каждый [26, с. 105] (рис. 4). Характерной особенностью маршрута судна было то, что большая часть разрезов пересекала Северо-Атлантическое течение и зону северной конвергенции. Первый из них проходил от мыса Финистерре Пиренейского полуострова

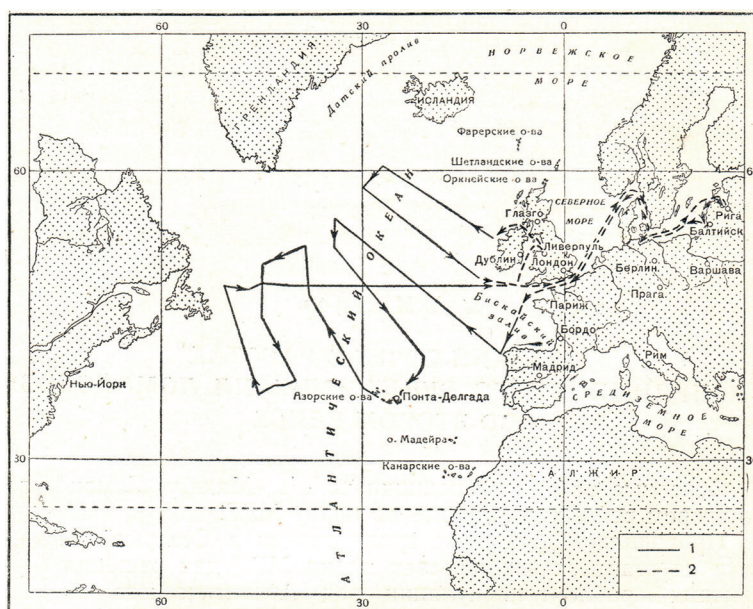


Рис. 4. Схема маршрута 2-го рейса НИС «Михаил Ломоносов» (18 февраля — 15 июня 1958 г.). [27]

Fig. 4. Route diagram of the 2nd voyage of the R/V «Mikhail Lomonosov» (February 18 — June 15, 1958). [27]

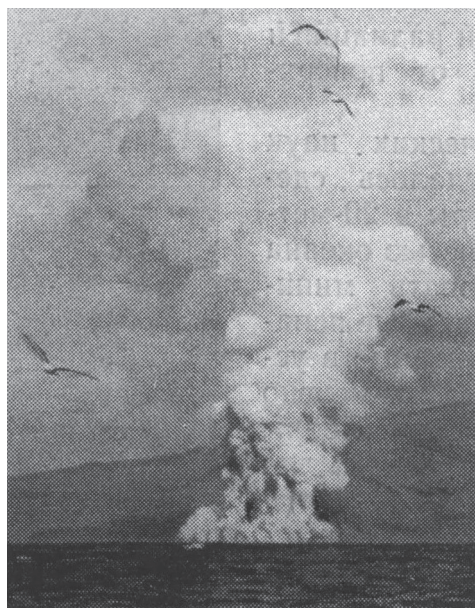
на северо-запад с пересечением района подводного Северо-Атлантического хребта. Три последующих пересекали Северо-Атлантическое течение и зоны полярного фронта, пятый пролегал через район вод течений Гольфстрима, Антильского и холодного Лабрадорского над Большой Ньюфаундлендской банкой [17, с. 114]. Одновременно в Северо-восточной части Атлантики работали другие советские научно-исследовательские суда «Севастополь», «Экватор», «Обь», а также суда других государств, так что в итоге исследования носили характер синхронной океанологической съёмки [14, л. 96; 26, с. 106].

С 4 марта экспедиция приступила к выполнению исследований на разрезах от мыса Финистерре Пиренейского полуострова. В результате было пройдено свыше 14000 миль, из них около 10000 миль с выполнением гидрологических разрезов. Всего было сделано 142 разовые дрейфовые станции и 3 суточные с постановкой судна на глубоководный якорь [27, с. 36]. Об итогах свидетельствуют количественные показатели выполнения плана МГГ: на всех станциях кроме трёх, работы проводились до дна с максимальной глубиной 5300 м, 28 станций было с глубинами свыше 4000 м, 23 станции — с глубинами от 3000 до 4000 м, как и было намечено [4, л. 52]. Кроме разрезов, намеченных по плану, экспедицией сверх того был выполнен западный разрез через Большую Ньюфаундлендскую банку, разрезы 11-й и 12-й по программе МГГ и дополнительный широтный разрез от Ньюфаундленда до берегов Англии по 50° с. ш.; общая протяжённость сверхплановых разрезов составила около 4000 миль [27, с. 36]. Собранные материалы позволили выдвинуть гипотезу о том, что основная часть Северо-Атлантического течения возникает в результате взаимодействия тёплых и холодных вод полярного фронта, была также построена карта радиоактивного загрязнения Северной Атлантики [17, с. 123].

Особенно интересными были наблюдения вулканической деятельности на дне океана. Характер записанного эхолотами рельефа новых подводных гор и образцы грунта, добытые со дна, свидетельствовали о подводных вулканических извержениях. В сентябре 1957 г. близ острова Фаял (Азорские острова) «родился» вулкан Каплиньиш, который и в следующем, 1958 г., продолжал свою деятельность. НИС «Михаил Ломоносов» удалось подойти близко к вулкану. Через равные промежутки из вулкана вырывался темный клубок пара и пепла, на глазах рос новый маленький островок (рис. 5).

НИС «Михаил Ломоносов» посетил Азорские острова (Португалия), порты Великобритании и ГДР. В г. Понто-Делгада на Азорских островах НИС «Михаил Ломоносов» посетила группа научных сотрудников местной Геофизической обсерватории во главе с директором [24, л. 1]. Ответным визитом советские ученые в составе 12-ти человек посетили местную геофизическую обсерваторию, где ознакомились с данными наблюдений температуры, влажности, осадков и других погодных параметров за несколько сотен лет.

Во время стоянки в порту Ливерпуля (Великобритания) научное судно посетили преподаватели и студенты Ливерпульского университета и Института приливов, среди которых были ведущие учёные Великобритании: океанограф, руководитель Института приливов доктор Дудсон (рис. 6), доктор Фейрбрейн, доктор Рейли, доктор Батарст, океанограф профессор Шеклтон, молодой египетский учёный Саад, профессор Купер, ботаник Бэрроус и другие. С ответным визитом советские учёные посетили Ливерпульский университет и Институт приливов, где ознакомились с работой лабораторий и оборудованием океанографического, геологического, химического и биологического профиля [26, л. 3].



Третий рейс НИС «Михаил Ломоносов» проходил с 26 июля по 31 августа 1958 г. Рейс выполнялся в составе Комплексной атлантической экспедиции, сформированной по предложению Управления гидрографической службы Военно-Морского флота СССР. В экспедиции помимо НИС «Михаил Ломоносов» участвовали также гидрографические суда «Экватор» и «Створ». Основными задачами экспедиции являлись: изучение изменений во времени

Рис. 5. Извержение вулкана Каплиньиш. 2-й рейс НИС «Михаил Ломоносов», Азорские острова, 1958 г. [Сузюмов Е.М. На просторах Атлантики // Наука и жизнь. 1958. № 9. С. 31–35]

Fig. 5. The eruption of the Kaplinish volcano. The 2nd flight of the NIS «Mikhail Lomonosov». The Azores, 1958 [Suzyumov E.M. In the vastness of the Atlantic // Science and Life. 1958. No. 9. Pp. 31–35]

Рис. 6. Английский гидрофизик, директор Института приливов А.Т. Дудсон (справа) на борту НИС «Михаил Ломоносов». Ливерпуль, 1958. [Сузюмов Е.М. На просторах Атлантики // Наука и жизнь. 1958. № 9. С. 31–35]

Fig 6. English hydrophysicist, Director of the Institute of Tides A.T. Dudson (right) on board the R/V “Mikhail Lomonosov”. Liverpool, 1958. [Suzyumov E.M. In the vastness of the Atlantic // Science and Life. 1958. No. 9. Pp. 31–35]



поверхностных и глубинных течений и закономерностей вертикального распределения элементов течений; скорости процессов взаимного приспособления поля течений и поля плотности воды в океане; условий формирования, закономерности существования и устойчивости слоя скачка плотности воды в океане; определение режима и элементов внутренних волн; элементов волнового поля при различной интенсивности океанского волнения; изменений метеорологических и аэрологических элементов [28, л. 1–5].

В исследования Комплексной атлантической экспедиции входило проведение трёх океанографических разрезов, синхронное выполнение трёх тридцатисуточных океанографических станций и попутные гидрометеорологические наблюдения. Каждое судно должно было, по сигналу с судна «Экватор», начать выполнение 16-ти океанографических станций по разрезу протяженностью около 3000 миль к западу от Британских островов [28, л. 19–20; 29, с. 41].

НИС «Михаил Ломоносов» по программе 4-го рейса находилось в плавании с 3 октября по 25 декабря 1958 г. Основной целью работ было изучение гидрофизических процессов, развивающихся в толще водных масс Атлантического океана и прилегающих к нему слоях атмосферы. Планом экспедиции предусматривалось производство четырёх разрезов. Важнейшей задачей было повторение стандартных океанологических наблюдений 2-го рейса НИС «Михаил Ломоносов» для получения характеристик сезонной изменчивости вод океана [30, с. 43]. Работы на разрезах производились приблизительно в тех же точках и по той же программе, что и во 2-м рейсе [14, л. 148]. Наблюдения выполнялись по возможности до дна океана, чтобы детально изучить характеристики водных масс на больших глубинах. Особый интерес для экспедиции представлял Полярный фронт. Маршрут рейса пересекал значительную часть Северо-Атлантического течения и частично Лабрадорское и Гольфстрим. Было пройдено около 12000 миль [30, с. 43].

Океанологические исследования по проблемам МГГ в Северной Атлантике были закончены на НИС «Михаил Ломоносов» 10 декабря 1958 г. 11 декабря судно пришвартовалось к пирсу дока Александер в Ливерпуле (Великобритания), чтобы провести чистку котлов, принять скоропортящиеся продукты, получить другое снабжение. Время прихода научно-исследовательского судна было заранее объявлено в английских газетах и по радио. Английская общественность интересовалась результатами научных работ, самим судном. На борту был организован приём студентов Ливерпульского университета, английских учёных: декана океанографического факультета университета — доктора Боудена, доктора Дудсона. В кают-компании с участием зарубежных учёных было проведено совещание, где советские исследователи доложили о результатах своих работ. С ответным визитом делегация советских учёных присутствовала на приёме мэра района доков мистера Хевью, 16 декабря была совершена экскурсия в Лондон с посещением Британского музея [31, л. 6–9].

Всего за 1958 г. Морской гидрофизический институт организовал 3 экспедиции на НИС «Михаил Ломоносов» по плану океанологических наблюдений МГГ. В результате этих и других исследований были определены запасы тепла в водах Северной Атлантики и скорость перемещения водных масс на север, что имело не только важное теоретическое, но и большое прикладное значение. Были установлены особенности строения водных масс северной части Атлантического океана, получены значительные материалы по рельефу дна и донным осадкам [32, с. 27].

6. Экспедиции НИС «Витязь» в Тихом океане

По программе Международного геофизического года от Советского Союза в исследованиях Тихого океана и дальневосточных морей принимали участие научно-исследовательские суда: «Витязь» Института

океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, совершивший четыре рейса в западную, северную и центральную части Тихого океана; «Океан», проводивший работы в его северо-западной части; «Вал», изучавший район, расположенный к юго-востоку от Курильских островов; «Жемчуг» и «Первенец», ходившие в Беринговом море, и дизель-электроход «Обь», обследовавший тихоокеанский сектор Антарктики. Президиумом ЦК КПСС было принято специальное постановление о проведении в западной части Тихого океана в июне-октябре 1957 г. океанографической экспедиции на НИС «Витязь» по программе МГГ, с составом участников в 36 человек, с правом захода в порт Маноквари (о. Новая Гвинея) или порт Рабаул (о. Новая Британия) [33, л. 53].

Особое значение по результатам исследований имеет 25-й рейс НИС «Витязь» (28.06.1957—11.10.1957) продолжительностью 105 суток. Начиная с этого рейса, в период Международного геофизического года «Витязь» вышел в открытые океанские просторы — в Западную часть Тихого океана, выполняя исследования от Японии до Новой Гвинеи. Именно в 1957 г., в 25-м рейсе, состоялось одно из важнейших для всей мировой океанологии событий — при изучении Марианской впадины эхолот судна зафиксировал рекордную глубину — 10960 м. После введения поправок считается, что глубина Марианской впадины составляет 11022 м. Кроме измерений глубин, учёными Института океанологии исследовались скорость и направление течений, а также на «Витязе» была отработана методика постановки судна на глубоководный якорь. Так, в 1959 г. «Витязь» установил мировой рекорд глубоководной якорной стоянки — 9600 м. Маршрут 25-го рейса «Витязя» был проложен в виде системы последовательных разрезов. Главной задачей было изучение водных масс и течений Тихого океана. Была построена схема циркуляции вод в западной части Тихого океана, было выявлено смещение на юг зон Северного Пассатного течения, Межпассатного противотечения и Южного Пассатного течения по сравнению с их средними границами в летний сезон [34, с. 82–83; 35, с. 30–31].

В 26-м рейсе (05.11.1957—27.02.1958) исследовалась центральная часть Тихого океана. Впервые были собраны комплексные данные по всем направлениям океанологии. Были проведены наблюдения над температурой и солёностью до глубины 2000–2500 м и выполнены серийные инструментальные наблюдения над течениями самописцами Алексева на горизонтах 10, 50, 100, 200, 500 и 1000 м. Полученные данные легли в основу характеристики поля скорости в центральной части Тихого океана. В этом же рейсе были проведены измерения оптических характеристик поверхностных и глубинных вод на океанографических станциях, располагавшихся по двум меридиональным разрезам. На основе полученных материалов было доказано соответствие между вертикальной структурой течений и распределением показателя ослабления света. Важное место в исследованиях «Витязя» тех лет занимало изучение морфологии глубоководных желобов, осадков, а также динамики вод в желобах и в придонном слое вод. Необходимость работы в этих направлениях возникла в 1950-е гг. в связи с идеей захоронения отходов атомной промышленности на дне глубоководных океанических впадин. Считалось, что придонные воды не могут перемешиваться с поверхностными, следовательно, такие могильники не принесут вреда. Специальные исследования «Витязя» неопровержимо доказали недопустимость таких захоронений ввиду активной придонной циркуляции вод. Так, в желобах Тонга и Кермадек в 26-м рейсе была обнаружена активная циркуляция и отсутствие застойных условий, что доказывало невозможность захоронения в этих желобах радиоактивных отходов [34, с. 84; 35, с. 31, 36, 80].

В 1958 г. в 27-м рейсе «Витязя» (20.03.1958—20.06.1958, третьего по программе МГГ) проводились исследования в западной части Тихого океана. Были проведены инструментальные исследования гидрофизических полей в регионе, осуществлено измерение экваториальных течений, в том числе истоков противотечения Кромвелла. Была изучена структура системы экваториальных течений и изменчивости гидрологических характеристик во времени и в пределах течений. В четвёртом и последнем рейсе по плану МГГ (28-й рейс, 11.08.1958—14.09.1958) выполнялись исследования в северо-западной части Тихого океана восточнее Японии. Изучались глубинные течения, циркуляция вод, изменчивость теплового и химического состояния. В 1958 г. при помощи автономных буйковых станций зафиксировали на глубинах свыше 1 км течения со скоростями до десятка сантиметров в секунду. Оперативно получали данные о вертикальном распределении температуры воды. С середины 1950-х гг. впервые применялись автономные самописцы течения БПВ-2, с глубиной погружения 1500 м. На их базе были разработаны автономные самописцы БПВ-3А и БПВ-3Б, с глубиной погружения 3 и 6 км, с их помощью были измерены придонные течения в Мировом океане. Одной из главных задач 28-го рейса стало изучение акустических характеристик звуко-рассеивающих слоёв и характеристик звука, распространяющегося в толще вод [34, с. 87; 35, с. 31–32, 37].

Большое внимание уделялось также исследованиям геологии океана, это направление входило в программу экспедиций по плану МГГ и Международного года сотрудничества (1959 г.). В 1957–1958 гг. был

изучен рельеф северо-западной части Тихого океана, были получены данные о существовании новых форм подводного рельефа, о морфологии и простирации крупных форм рельефа дна. В 25-м рейсе были сделаны снимки дна океана на глубинах до 6000 м. В 27-м рейсе проведены были записи зоны разлома в Филиппинской, Восточно-Каролинской, Северо-Фиджийской котловинах. В 29-м рейсе впервые выполнено поперечное пересечение Тихого океана, осуществлено было траление в Марианской впадине на глубинах более 10000 м. Собран был большой материал по распространению и составу железомарганцевых конкреций. Для изучения количественного и качественного состава взвеси в морской воде пользовались батометрами большого объёма на 200 и 500 л [35, с. 65, 74].

В ходе МГГ НИС «Витязь» совершил заходы в порты Японии, Канады, США, Новой Зеландии, Новой Гвинеи, Новой Британии, Фиджи, Новой Каледонии. В Веллингтоне, Ванкувере и Сан-Франциско на борту «Витязя» для иностранных учёных были проведены конференции.

7. Проведение V-й Ассамблеи Специального комитета МГГ в Москве

Итоги проделанной работы в ходе геофизических исследований и формы дальнейшего сотрудничества планировалось обсудить на V-ой Ассамблее Специального комитета МГГ. Планирование проведения ассамблеи вошло в завершающую стадию, когда члены консультативной комиссии при Президиуме АН СССР по проведению МГГ обратилась к директору МГИ В.В. Шулейкину с извещением о планируемом созыве ассамблеи в июле 1958 г. и просьбой принять активное участие в её подготовке [4, л. 125–126]. Институт также сделал предложение о приглашении на ассамблею иностранных коллег, присутствие которых на заседаниях представлялось желательным. Были приглашены: учёный секретарь национального комитета ГДР по проведению МГГ Х. Филиппс, участник экспедиции на НИС «Михаил Ломоносов» от Института мореведения и Гидрографической службы ГДР Е.В. Брунс, декан океанографического факультета Шаньдунского университета КНР Хэн Цунь-Бэн, заместитель директора Морского биологического института Академии наук КНР Цэн Чэн-Куэ, профессор А.В. Раецкий из Польши, организатор океанографической экспедиции на датском судне «Галатея» А.Ф. Брун из Дании, профессор Вудсхоллского Океанографического института Г. Стоммел, известный своими исследованиями Гольфстрима, директор Музея океанографии в Монако Дм. Руш, профессор Геофизического института при Токийском университете К. Хидака и австрийский метеоролог и океанограф А. Дефант [4, л. 132–133].

Сама ассамблея проходила с 30 июля по 9 августа 1958 г. в г. Москве. Все заседания ассамблеи проходили в МГУ им. М.В. Ломоносова на Ленинских горах: пленарные заседания и симпозиум по ракетам и спутникам в актовом зале, остальные заседания — преимущественно в аудиториях физического факультета [36, с. 3]. 31 июля на ассамблее были прочитаны две публичные лекции: первая — С.Н. Вернова и А.Е. Чудакова о наблюдении за космическими лучами с помощью искусственных спутников Земли; вторая — Л.А. Зенкевича об океанографических работах на НИС «Витязь». С 4 по 6 августа 1958 г. на ассамблее проходил международный симпозиум по океанографии, а 9 августа состоялось заключительное пленарное заседание, на котором были приняты резолюции рабочих групп [37, л. 1–2].

Перед началом работы ассамблеи И.П. Бардин в июле 1958 г. обратился в Отдел науки, вузов и школ ЦК КПСС с просьбой разрешить советской делегации выступить на ассамблее с предложением о продлении МГГ на следующий год. Решением Президиума ЦК КПСС от 11 июля 1958 г. такое разрешение было дано [38, л. 13; 39, л. 93–94]. Таким образом, на заседании рабочей группы по океанографии советская делегация внесла предложение продлить Международный геофизический год ещё на один календарный год до 31 декабря 1959 г. в форме Международного года сотрудничества (далее — МГС), мотивируя это необходимостью продолжить наблюдения и обработкой полученных данных [14, л. 151; 37, л. 3].

Представители Франции, ФРГ, США, Японии, Великобритании, Аргентины и Италии в своих выступлениях также сходились на том, что необходимо продолжить международное сотрудничество, возникшее в период МГГ. В результате обсуждения была принята резолюция, в которой подчёркивалось, что океанографические исследования, начатые в период МГГ, должны быть продолжены в 1959 г. под эгидой Специального комитета по океанографическим исследованиям и научных национальных союзов [14, л. 159].

На совещании по проблеме работы Мировых центров сбора и хранения данных было рекомендовано превратить их в постоянно действующие учреждения, которые должны были в течение длительного времени хранить и распространять материалы МГГ [40, с. 370–371]. Был разработан детальный план публикаций результатов МГГ в центральных изданиях. Изложение основных результатов должно было потребовать выпуска свыше 40 томов специального журнала «Анналов Международного геофизического года» (*Annals of The International Geophysical Year*) [37, л. 3]. Было также принято решение об окончании работы над ру-

копией специального океанографического тома «Анналов Международного геофизического года», ряд разделов которого поручили написать советским учёным. Участники совещания достигли соглашения, что главы данной рукописи должны были состоять из кратких отчётов, подытоживавших работу всех стран [14, л. 153–188].

Во время Ассамблеи был поставлен вопрос о выборе нового вице-президента из состава членов Бюро Специального комитета МГГ. Бельгийский учёный Ван-Мигем предложил кандидатуру В.В. Белоусова, которая была единогласно поддержана. Кроме того, во время Ассамблеи рабочие группы провели научные симпозиумы, на которых было заслушано большое число докладов. Советские ученые представили на симпозиумы Ассамблеи 90 докладов. Многие из заслушанных докладов основывались на результатах первых наблюдений, проведенных в ходе МГГ, и представляли значительный научный интерес [37, л. 6–7].

8. Заключение

Участие советских учёных в мероприятиях Международного геофизического года стало важным этапом международного сотрудничества в проведении гидрофизических наблюдений Мирового океана. Не занимавшие ранее весомых постов в международных организациях советские учёные благодаря своим компетенциям и государственным ассигнованиям в проведение исследований смогли сделать больше количество научных открытий, уточнив природу течений, причины возникновения цунами, роль океана в формировании циркуляции атмосферы. Используемые в исследованиях научные суда и наблюдательные станции были готовы принять помимо советских учёных еще и их международных коллег как из дружественных социалистических стран, так и из тех капиталистических стран, с которыми СССР находился в геополитическом соперничестве. Большую роль для продолжения исследований МГГ имело проведение в Москве V-й Ассамблеи Специального комитета МГГ, где, несмотря на некоторое противодействие американских учёных, было решено продолжить исследования после 1958 г. по программе Международного года сотрудничества.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 20-78-10095-П, проект «Советская наука как индустрия: кадры, инфраструктура, организационно-управленческие практики (1920–1970-е гг.)»

Funding

The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant № 20-78-10095-P “Soviet Science as an Industry: Personnel, Infrastructure, Organizational and Management Practices (1920s-1970s)”.

Литература

1. Архив РАН. Ф. 579. Оп. 3. Д. 481.
2. Родников А.Г. 50 лет Международному геофизическому году. URL: <http://ngc.gcras.ru/history.html> (дата обращения: 12.10.2024).
3. Буланже Ю.Д. Координация исследований по программе Международного геофизического года // Вестник Академии наук СССР. 1957. № 1. С. 55–59.
4. Научные фонды МГИ. Ф. 1. Оп. 1. Д. 96 (105).
5. Научные фонды МГИ. Ф. 1. Оп. 1. Д. 87 (95).
6. Архив РАН. Ф. 579. Оп. 1–1956. Д. 12.
7. РГАНИ. Ф. 4. Оп. 16. Д. 197.
8. Архив РАН. Ф. 2. Оп. 1–1956. Д. 103.
9. Лактионов А.Ф. Международный геофизический год в Антарктике. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 180 с.
10. Архив РАН. Ф. 1956. Оп. 1. Д. 174.
11. Научные фонды МГИ. Годовой отчёт о научно-исследовательской работе института за 1956 г. Инв. № 87.
12. Дерюгин К.К. Советские океанографические экспедиции / Под ред. В.В. Шулейкина. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 235 с.
13. Шулейкин В.В. Дни прожитые. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1972. 603 с.
14. Научные фонды МГИ. Ф. 1. Оп. 1. Д. 110 (120).
15. РГАНИ. Ф. 4. Оп. 16. Д. 225.

16. Научные фонды МГИ. Ф. 1. Оп. 1. Д. 93 (102).
17. Пономаренко Г.П. Изучение Северо-Атлантического течения по материалам МГГ // Труды Морского гидрофизического института. 1963. Т. 28. С. 112–123.
18. Научные фонды МГИ. Отчёт о работе первого рейса э/с «Михаил Ломоносов» в Атлантическом океане. Инв. № 114.
19. Иванов А.А. Атлантическая экспедиция Морского гидрофизического института АН СССР // Труды Морского гидрофизического института. 1962. Т. 21. С. 3–7.
20. Иванов А.А. Первый рейс э/с «Михаил Ломоносов» // Бюллетень океанографической комиссии. 1960. № 5. С. 30–34.
21. Научные фонды МГИ. Годовой отчёт о научно-исследовательской работе института за 1958 г. Инв. № 163.
22. Научные фонды МГИ. Документация 2-го рейса НИС «Михаил Ломоносов». Инв. № 159.
23. Научные фонды МГИ. Документация 2-го рейса НИС «Михаил Ломоносов». Инв. № 171.
24. Научные фонды МГИ. Документация 2-го рейса НИС «Михаил Ломоносов». Инв. № 180.
25. Научные фонды МГИ. Отчёт начальника Атлантической экспедиции во втором рейсе э/с «Михаил Ломоносов» доктора физ.-мат. наук А.А. Иванова. Инв. № 167.
26. Плехотник А.Ф. Краткая история экспедиционных исследований по физической океанологии в СССР. М.: Наука, 1970. С. 72–155.
27. Иванов А.А. Краткий отчёт о работах э/с «Михаил Ломоносов» во втором рейсе // Бюллетень океанографической комиссии. 1960. № 5. С. 35–39.
28. Научные фонды МГИ. Отчёт Атлантической экспедиции МГИ АН СССР (3 рейс) на э/с «Михаил Ломоносов». Инв. № 951.
29. Пономаренко Г.П. Изучение течений северо-восточного района Атлантического океана в третьем рейсе э/с «М. Ломоносов» // Бюллетень океанографической комиссии. 1960. № 6. С. 41–42.
30. Пономаренко Г.П. Четвёртый рейс э/с «Михаил Ломоносов» в Атлантическом океане // Бюллетень океанографической комиссии. 1960. № 6. С. 43–44.
31. Научные фонды МГИ. Ф. 1. Оп. 1. Д. 131 (141а).
32. Сысоев Н.Н. Океанологические исследования советских учёных // Вестник Академии наук СССР. 1960. № 2. С. 21–32.
33. РГАНИ. Ф. 3. Оп. 14. Д. 129.
34. Антонова Л.В., Воробьёва Ю.В. НИС «Витязь» — флагман научного флота золотого века отечественной науки об океане // Океанологические исследования. 2021. Т. 49. № 3. С. 70–105. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(3).5
35. Степанчук Ю.В. Вклад учёных НИС «Витязь» в развитие океанологии (1949–1979 гг.): дисс. ... канд. геогр. наук: 07.00.10 / ИИЕТ им. С.И. Вавилова РАН. М., 2016. 151 с.
36. Буланже Ю.Д. V Ассамблея МГГ // Наука и жизнь. 1958. № 10. С. 3–12.
37. Архив РАН. Ф. 579. Оп. 1–58–62. Д. 16.
38. РГАНИ. Ф. 3. Оп. 14. Д. 223.
39. Архив Президента РФ. Ф. 3. Оп. 33. Л. 93–94.
40. Кудашин А.С. Создание в СССР Мирового центра данных по планетарной геофизике (1957–1960 гг.) // Вопросы истории естествознания и техники. 2015. Т. 36. № 2. С. 368–376.

References

1. Archive RAN. F. 579. Op. 3. D. 481 (In Russian).
2. Rodnikov A.G. 50 years of the International Geophysical Year. URL: <http://ngc.gcras.ru/history.html> (Accessed 12.10.2024).
3. Bulanzhe Y.D. Coordination of research under the program of the International Geophysical Year. *Vestnik Akademii nauk SSSR*. 1957;1:55–59 (In Russian).
4. Nauchnie fondi MGI. F. 1. Op. 1. D. 96 (105) (In Russian).
5. Nauchnie fondi MGI. F. 1. Op. 1. D. 87 (95) (In Russian).
6. Archive RAN. F. 579. Op. 1–1956. D. 12 (In Russian).
7. RGA NI. F. 4. Op. 16. D. 197. (In Russian).
8. Archive RAN. F. 2. Op. 1–1956. D. 103 (In Russian).
9. Laktionov A.F. International Geophysical Year in Antarctica. Leningrad: Gidrometeoroloizdat; 1957. 180 p. (In Russian).

10. Archive RAN. F. 1956. Op. 1. D. 174 (In Russian).
11. Nauchnie fondi MGI. Annual report on research work of the Institute for 1956. Inventory No. 87 (In Russian).
12. Deryugin K.K. Soviet oceanographic expeditions. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1968. 235 p. (In Russian).
13. Shuleykin V.V. Days gone by. Moscow, 1972. 603 p. (In Russian).
14. Nauchnie fondi MGI. F. 1. Op. 1. D. 110 (120) (In Russian).
15. RGANI. F. 4. Op. 16. D. 225 (In Russian).
16. Nauchnie fondi MGI. F. 1. Op. 1. D. 93 (102) (In Russian).
17. Ponomarenko G.P. Study of the North Atlantic Current based on the IGY materials. *Trudy Morskogo gidrofizicheskogo instituta*. 1963;28:112–123 (In Russian).
18. Nauchnie fondi MGI. Report on the first voyage of the “Mikhail Lomonosov” in the Atlantic Ocean. Inventory No. 114. (In Russian).
19. Ivanov A.A. Atlantic expedition of the Marine Hydrophysical Institute of the USSR Academy of Sciences. *Trudy Morskogo Gidrofizicheskogo Instituta*. 1962;21:3–7 (In Russian).
20. Ivanov A.A. The first flight of the electric ship “Mikhail Lomonosov”. *Byulleten’ Okeanograficheskoy Komissii*. 1960;5:30–34 (In Russian).
21. Nauchnie fondi MGI. Annual report on the research work of the Institute for 1958. Inv. No. 163. (In Russian).
22. Nauchnie fondi MGI. Documentation of the 2nd voyage of the R/V “Mikhail Lomonosov”. Inventory No. 159. (In Russian).
23. Nauchnie fondi MGI. Documentation of the 2nd voyage of the R/V “Mikhail Lomonosov”. Inventory No. 171. (In Russian).
24. Nauchnie fondi MGI. Documentation of the 2nd voyage of the R/V “Mikhail Lomonosov”. Inventory No. 180. (In Russian).
25. Nauchnie fondi MGI. Report of the Head of the Atlantic Expedition on the second voyage of the s/s “Mikhail Lomonosov” Dr. A.A. Ivanov. Inventory No. 167. (In Russian).
26. Plakhotnik A.F. Brief history of expeditionary research in physical oceanology in the USSR. Moscow, 1970. 72–155 (In Russian).
27. Ivanov A.A. Brief report on the work of the electric ship “Mikhail Lomonosov” on the second voyage. *Byulleten’ Okeanograficheskoy Komissii*. 1960;5:35–39 (In Russian).
28. Nauchnie fondi MGI. Report of the Atlantic Expedition of the MSI of the USSR Academy of Sciences (3rd voyage) on the “Mikhail Lomonosov”. Inventory No. 951 (In Russian).
29. Ponomarenko G.P. Study of currents of the north-eastern region of the Atlantic Ocean during the third voyage of the R/V “M. Lomonosov”. *Byulleten’ Okeanograficheskoy Komissii*. 1960;6:41–42 (In Russian).
30. Ponomarenko G.P. The fourth voyage of the ship “Mikhail Lomonosov” in the Atlantic Ocean. *Byulleten’ Okeanograficheskoy Komissii*. 1960;6:43–44 (In Russian).
31. Nauchnie fondi MGI. F. 1. Op. 1. D. 131 (141a) (In Russian).
32. Sysoev N.N. Oceanological research of Soviet scientists. *Vestnik Akademii Nauk SSSR*. 1960;2:21–32 (In Russian).
33. RGANI. F. 3. Op. 14. D. 129 (In Russian).
34. Antonova L.V., Vorobyova Yu.V. R/V “Vityaz” — flagship of the scientific fleet of the golden age of soviet ocean science. *Journal of Oceanological Research*. 2021;49(3):70–105. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(3).5 (In Russian).
35. *Stepanchuk Yu.V.* Contribution of scientists of the research vessel Vityaz to the development of oceanography (1949–1979): diss. kand. geograph. nauk. M.: IJET; 2016. 151 p. (In Russian).
36. Boulanger Yu.D. VIYY Assembly. *Nauka i Zhizn’*. 1958;10:3–12 (In Russian).
37. Archive RAN. F. 579. Op. 1-58-62. D. 16 (In Russian).
38. RGANI. F. 3. Op. 14. D. 223 (In Russian).
39. Archive Prezidenta RF. F. 3. Op. 33. L. 93–94 (In Russian).
40. Kudashin A.S. The USSR’S world data center on Planetary Geophysics, 1957–1960. *Voprosy Istorii Estestvoznaniya i Tehniki*. 2015;36(2):368–376 (In Russian).

Об авторах

ГРИШИН Максим Геннадьевич, ассоциированный сотрудник ИИЕТ РАН, кандидат географических наук, РИНЦ AuthorID: 1139372, e-mail: max1074@mail.ru

СОБИЩЕВИЧ Алексей Владимирович, ведущий научный сотрудник ИИЕТ РАН, старший научный сотрудник РГГУ, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0003-1088-9221, WoS ResearcherID: E-5822-2016, Scopus AuthorID: 57196246202, SPIN-код (РИНЦ): 7611-5405, e-mail: sobisevich@mail.ru