

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

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

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА

ТОМ 15, № 4
2022

FUNDAMENTAL AND APPLIED HYDROPHYSICS

VOL. 15, No. 4
2022

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

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА

Том 15 № 4 2022

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

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

Редактор *А. В. Сторожевых*

Подписано к печати 30.11.2022 г. Дата выпуска в свет 30.12.2022 г. Формат 60 × 84¹/₈.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,0. Уч.-изд. л. 16,7. Тираж 50 экз. Тип. зак. № 5844.

Изготовление оригинал-макета и печать
Издательско-полиграфический центр Политехнического университета Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 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. 15 No. 4 2022

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

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

Editing: *A. V. Storozhevykh*

Signed for printing: 30.11.2022. Issued: 30.12.2022. Format: $60 \times 84^{1/8}$.
Digital printing. Printed sheets: 17.0. Circulation: 50 pcs.

Production of the original layout and printing
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)
- Еремина 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)
- Иванов Михаил Павлович*, к.б.н. (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)
- 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)
- Софьяна 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)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- Бабанин Александр Владимирович* (Мельбурнский Университет, Мельбурн, Австралия)
- Бондур Валерий Григорьевич*, академик РАН (Вице-президент Российской академии наук, 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 (Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, Россия)
- Саркисов Ашот Аракелович*, академик РАН (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, 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.* Cand.Sci., St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
- Andrey G. Zatsepin.* Cand.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
- 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
- Mikhail P. Ivanov.* Cand.Sci., St. Petersburg State University, St. Petersburg, 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
- Victor M. Zhurbas.* Cand.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
- Ashot A. Sarkisov.* Academician of RAS, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 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, Vice President of the Russian Academy of Sciences, 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, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
- Victor V. Zosimov.* Research Institute of Applied Acoustics, Dubna, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Научные статьи

Новотрясов В.В., Дубина В.А., Митник Л.М. Восстановление параметров внутренних приливных боров в море Банда по данным спутникового дистанционного зондирования	8
Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века	23
Ковалёва И.В., Финенко З.З., Суслин В.В. Тренды изменения первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования в глубоководной области Черного моря в 1998–2015 годы	42
Аглова Е.А., Глуховец Д.И. Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла <i>a</i> в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей	54
Вострякова Д.В., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Даниличева О.А., Ермаков С.А. Лабораторное исследование компрессии поверхностно-активной пленки и трансформации ее границы под действием поверхностной волны	63
Консон А.Д., Волкова А.А. Модуляция шумового сигнала при качке корабля вследствие флуктуирующей интерференции лучей	74
Степаненко В.М., Ломов В.А., Гречушников М.Г. Численное моделирование временной изменчивости эмиссии метана из Можайского водохранилища	82
Аншаков А.С. Моделирование гидродинамических и литодинамических береговых процессов в районе морского порта (на англ. яз.)	101
Родионов А.А., Румянцев В.А., Фёдоров М.П., Зиновьев А.Т., Кривошей В.А., Медведева О.Е., Троицкая Ю.И., Дёмин С.П., Малова Т.И., Чусов А.Н., Шишкина О.Д., Моисеев А.В., Каменский С.Б., Краев И.М., Марусин К.В. Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе	109
Малова Т.И., Родионов А.А. Катастрофическое наводнение Невы 10 (21) сентября 1777 г. Так в каких же футах оно было измерено...	132

Разное

Машошин А.И. Рецензия на монографию Г.С. Малышкина и В.С. Мелькановича «Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике»	140
---	-----

Конференции

XXVIII Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» в г. Томске	142
Тематический указатель 2022 (Т. 15)	143
Авторский указатель 2022 (Т. 15)	146

CONTENTS

Scientific articles

<i>Novotryasov V.V., Dubina V.A., Mitnik L.M.</i> Reconstructing the parameters of internal tidal bores in the Banda Sea from satellite remote sensing data	8
<i>Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A.</i> Spatial and temporal variability of the characteristics of the river plume frontal zone in the Kara Sea in the first two decades of the XXI century	23
<i>Kovalyova I.V., Finenko Z.Z., Suslin V.V.</i> Trends in changes in primary phytoplankton production according to remote sensing data in the deep-sea region of the Black Sea for 1998–2015	42
<i>Aglova E.A., Glukhovets D.I.</i> Examples of the water dynamics influence on the spatial distribution of chlorophyll <i>a</i> fluorescence intensity in the surface layer of the Barents and Norwegian Seas	54
<i>Vostryakova D.V., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Danilicheva O.A., Ermakov S.A.</i> Laboratory study of surfactant film compression and boundary transformation under the action of surface waves	63
<i>Konson A.D., Volkova A.A.</i> Noise signal modulation at the ship rolling and pitching due to fluctuating interference of beams	74
<i>Stepanenko V.M., Lomov V.A., Grechushnikova M.G.</i> Numerical simulation of temporal variability of methane emissions from Mozhaysk Reservoir	82
<i>Anshakov A.S.</i> Modeling of hydrodynamic and lithodynamic coastal processes in the harbour area	101
<i>Rodionov A.A., Rumyantsev V.A., Fyodorov M.P., Zinoviev A.T., Krivoshei V.A., Medvedeva O.Ye., Troitskaya Yu.I., Dyomin S.P., Malova T.I., Chusov A.N., Shishkina O.D., Moiseev A.V., Kamenskiy S.B., Krayev I.M., Marusin K.V.</i> Solution options for problems of navigation on a limited section of the Volga River from Gorodetsky hydroelectric complex to Nizhny Novgorod, including taking into account the assessment of the impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region	109
<i>Malova T.I., Rodionov A.A.</i> The catastrophic flood of the Neva, September 10 (21), 1777. So, in what feet it was measured...	132

Others

<i>Mashoshin A.I.</i> Review of the monograph by G.S. Malyshkin and V.S. Melkanovich “Classical and fast projection adaptive algorithms in hydroacoustics”	140
--	-----

Conferences

XXVIII International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics” in Tomsk	142
---	-----

УДК 551.466.8; 528.88

© В. В. Новотрясов*, В. А. Дубина, Л. М. Митник, 2022

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, 690041, Россия
*vadimnov@poi.dvo.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВНЫХ БОРОВ В МОРЕ БАНДА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 28.12.2021, после доработки 14.07.2022, принята в печать 08.08.2022

Аннотация

Представлен алгоритм для оценки вертикальных смещений изопикн и скоростей горизонтальных течений, вызванных внутренними приливными борами по их проявлениям в поле шероховатости на спутниковых изображениях моря Банда. Алгоритм расчёта сформулирован с использованием уравнения Кортевега-де Вриза (KdV), дополненного слагаемым, учитывающим цилиндрическую расходимость. Коэффициенты уравнения KdV — квадратичная нелинейность, дисперсия и скорость линейных внутренних волн с приливной частотой, были рассчитаны с использованием среднеклиматического профиля плотности в море Банда. По спутниковым изображениям были определены скорость солитона, лидирующего в боре, и длина волны в его тыловой зоне. С помощью предложенной методики получены оценки максимального вертикального смещения пикноклина/максимальной амплитуды лидирующего солитона и максимальной скорости поверхностных течений, индуцированных внутренними приливными борами. Из анализа спутниковых наблюдений следует, что внутренние приливные боры в море Банда трансформируются под действием не только нелинейности и дисперсии, но и цилиндрической расходимости. В рамках кноидальной модели внутренних приливных боров показано, что в процессе эволюции энергия его лидирующей и последующих волн затухает вследствие цилиндрической расходимости. Выполнена оценка этого затухания при прохождении расстояния, которое преодевает лидирующий солитон за время, равное удвоенному приливному периоду.

Ключевые слова: внутренние приливные боры, море Банда, уравнение Кортевега-де Вриза, солитоны, кинематические и динамические характеристики, спутниковые изображения РСА

© V. V. Novotryasov*, V. A. Dubina, L. M. Mitnik, 2022

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia.
*E-mail: vadimnov@poi.dvo.ru

RECONSTRUCTING THE PARAMETERS OF INTERNAL TIDAL BORES IN THE BANDA SEA FROM SATELLITE REMOTE SENSING DATA

Received 28.12.2021, Revised 14.07.2022, Accepted 08.08.2022

Abstract

This article presents an algorithm for estimating the vertical displacements of isopycn and horizontal current velocities caused by internal tidal borings from their manifestations in the roughness field on satellite images of the Banda Sea. The calculation algorithm is formulated within the framework of the Korteweg-de Vries equation (KdV), augmented with a term taking into account the cylindrical divergence. The coefficients of the KdV equation — quadratic nonlinearity, dispersion and tidal linear internal wave velocity — were calculated using the mean — climatic density profile in the Banda Sea. The leading soliton velocity and wavelength in the rear zone of the internal tidal borings were determined from satellite images. Using the proposed methodology, estimates of the maximum vertical displacement of the pycnocline/maximum amplitude of the leading soliton and the maximum velocity of surface currents induced by the internal tidal borings were obtained. It follows from the analysis of satellite images that the internal tidal borings in the Banda Sea are transformed under the action not only of nonlinearity and dispersion, but also of cylindrical divergence. It is shown in the framework of the knoidal model of internal tidal borings that in the process of evolution the energy of its leading and subsequent waves is attenuated due to the cylindrical divergence. This attenuation is estimated when the leading soliton travels a distance equal to twice the tidal period.

Keywords: internal tidal bores, Banda Sea, Korteweg-de Vries equation, solitons, kinematic and dynamic characteristics, SAR satellite images

Ссылка для цитирования: Новотрясов В.В., Дубина В.А., Митник Л.М. Восстановление параметров внутренних приливных боров в море Банда по данным спутникового дистанционного зондирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 8–22. doi:10.48612/fpg/bvve-b2up-ru85

For citation: Novotryasov V.V., Dubina V.A., Mitnik L.M. Reconstructing the Parameters of Internal Tidal Bores in the Banda Sea from Satellite Remote Sensing Data. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 8–22. doi:10.48612/fpg/bvve-b2up-ru85

1. Введение

Уединенные внутренние волны (ВВ)/солитоны ВВ представляют класс высокочастотных, нелинейных гравитационных волн, которые повсеместно наблюдаются над шельфом океанов и в окраинных морях [1–4]. Уединённые ВВ могут усиливать перемешивание океана, являются важным звеном в рассеивании энергии баротропного прилива [5, 6]. Кроме того, этот волновой процесс оказывает значительное влияние на буровые работы на шельфе [7], перенос загрязняющих веществ, вторичных отложений [8], распространение звуковых волн [9] и прибрежные экосистемы [10]. По этим причинам процессы генерации и распространения этих волн, их крутизна и диссипация являются предметом интенсивных исследований в последние несколько десятилетий.

Солитоны ВВ, вызывая вариации течений, модулируют шероховатость морской поверхности, что делает их различимыми на спутниковых изображениях, полученных в видимом и ближнем ИК диапазонах и радаром с синтезированной апертурой (РСА), на которых они отображаются в виде чередующихся светлых и темных полосы [11]. Поэтому спутниковые РСА являются мощным инструментом дистанционного зондирования для исследования этих волн [12].

Данные РСА широко применяются для определения характеристик этих волн, таких как полуширина, длина гребня, количество волн в пакетах подобных волн, направление и скорость распространения и амплитуда волн [13–16]. Солитоны ВВ, распространяясь по пикноклину, вызывают смещение изопикн от их равновесных положений. Максимальное смещение изопикн определяет амплитуду солитонов [17, 18].

Изучение изменчивости амплитуды — важнейшей характеристики солитонов — необходимо для понимания процессов эволюции и диссипации этого нелинейного волнового процесса. Измерения на морских полигонах с использованием, например, температурных кос, могут достаточно точно определить амплитуду солитонов. Однако амплитуда изменяется в процессе их распространения из-за изменений в стратификации и батиметрии. Полигонные исследования не могут надлежащим образом выявить такие изменения. Поэтому мы ожидаем, что амплитуды уединённых ВВ будут получены из данных космического дистанционного зондирования, например, данных РСА, поскольку РСА даёт возможность для получения изображений с большой шириной полосы обзора, которая не зависит от дневного света, облачности и погодных условий.

В последние годы было предложено несколько методов для определения амплитуд солитонов ВВ по интенсивности изображений РСА. Большинство из этих методов используют солитонные решения нелинейных уравнений эволюции ВВ с непрерывной [18–21] или двухслойной моделью морской среды [22–24].

Оценка амплитуды уединённой ВВ по измерениям пространственной изменчивости сигнала РСА (яркости РСА изображения) на основе непрерывной стратификации происходит следующим образом: 1) выбирается соответствующее уравнение для описания эволюции уединённой волны; 2) решение эволюционного уравнения используется для определения взаимосвязи между амплитудой ВВ и наблюдаемым сигналом этой волны на изображении; 3) характеристики ВВ извлекается из вариаций яркости изображения РСА; 4) определяется фоновый профиль частоты плавучести — $N_0(z)$ в районе наблюдения и мощность/толщина волновода, по которому распространяется ВВ; 5) с использованием $N_0(z)$ рассчитываются фоновые параметры окружающей среды; 6) на основе взаимосвязи, установленной на втором этапе, определяется амплитуда уединённой ВВ. Таким образом, в случае если информация о фоновой стратификации и соответствующее уравнение эволюции ВВ заданы, количественные сведения о ВВ, полученные по изображению РСА, имеет решающее значение для оценки характеристик этих волн.

При исследовании нелинейных ВВ используют три типа слабо нелинейных моделей, которые определяют процесс их эволюции в различных условиях: уравнение Кортевега-де Вриза (KdV) на мелководье [25, 26], уравнение Джозефа-Кубота на конечной глубине [27, 28], и уравнение Бенджамина-Оно в глубокой воде [29, 30].

Одним из ключевых факторов, обосновывающих выбор подходящей модели солитонов ВВ, является отношение горизонтального масштаба этих волн к глубине бассейна. Как мы покажем позже, длина волны ВВ в нашем случае больше, чем глубина исследуемого морского бассейна. В этой связи мы рассматриваем уединённые ВВ, как длинные нелинейные волны, эволюция которых описывается уравнением Кд В.

В данном исследовании для определения амплитуды солитонов ВВ мы предлагаем воспользоваться моделью внутреннего приливного бора. Пакеты ранжированных по амплитуде солитоноподобных ВВ, так называемые внутренние приливные боры (ВПБ), регулярно наблюдаются на спутниковых видимых и радиолокационных изображениях по их проявлениям в поле шероховатости морской поверхности, вызванных гидродинамическим взаимодействием между ветровыми волнами и вариациями поверхностного течения, индуцированного подобными борами [31, 32].

Последовательное описание этого нелинейного процесса в рамках уравнения КдВ для интерпретации спутниковых видимых и радиолокационных изображений, по-видимому, впервые, было дано в [33]. Солитонные

решения этого уравнения для исследования солитонов ВВ с помощью дистанционного зондирования РСА использовались, например, в [18, 20, 23, 24]. В работе [21] эта модель применена для определения кинематических параметров солитонов ВВ: квадратичной нелинейности, дисперсии и фазовой скорости длинных ВВ по данным полигонных измерений скорости и амплитуды солитона ВВ, лидирующего в приливном боре.

Цели работы: 1) получить соотношения для расчёта амплитуд солитонов внутренних приливных боров и скоростей течений, индуцированных солитонами этих боров на морской поверхности по измерениям скорости лидирующих солитонов в борах и длин волн в их тыловой зоне, полученных по изображениям морской поверхности; 2) воспользовавшись предложенной методикой, получить оценки максимальных смещений оси пикноклина / амплитуд солитонов и скоростей поверхностных течений, индуцированных этими солитонами боров в море Банда по данным проявлений боров на изображениях поверхности моря.

Для достижения поставленной цели в работе используется теория волновых боров слабой интенсивности с горизонтальной расходимостью. В рамках этой теории получены выражения для расчёта вертикальных смещений изопикн и горизонтальных скоростей течений, индуцированных солитоном, лидирующим в боре, и последующими кноидальными волнами внутреннего приливного бора, в том числе на морской поверхности. Расчёт амплитуд выполнен по измерениям скорости лидирующего солитона и длин волн в тыловой зоне бора, найденных по проявлениям этих боров на изображениях моря Банда, полученных РСА со спутников Envisat и ERS 2, и оптических со спутника Himawari-8.

2. Море Банда

Море Банда является частью Индонезийского транзитного потока, который представляет собой важный путь для потока западных хорошо структурированных тропических тихоокеанских вод в юго-восточную часть Индийского океана через индонезийские моря. Его протяженность с востока на запад составляет около 1000 км, а с севера на юг — около 500 км (рис. 1). Оно занимает площадь 470000 км² и выходит к морям Флорес (на западе), Саву (на юго-западе), Тимор (на юге), Арафура (на юго-востоке), Керам и Молукка (на севере). Средняя глубина моря — 4700 м.

Результаты судовых исследований гидрологической структуры и циркуляции вод в море Банда и в окружающих его морях рассмотрены в работах [34–37]. Было установлено, что в этих морях под воздействием различных физических процессов формируется хорошо выраженный, средне-климатический пикноклин шириной до 300 м с максимумом частоты плавучести из интервала 10–12 цикл/ч, залегающий в зависимости от сезона года на глубинах 150–300 м.

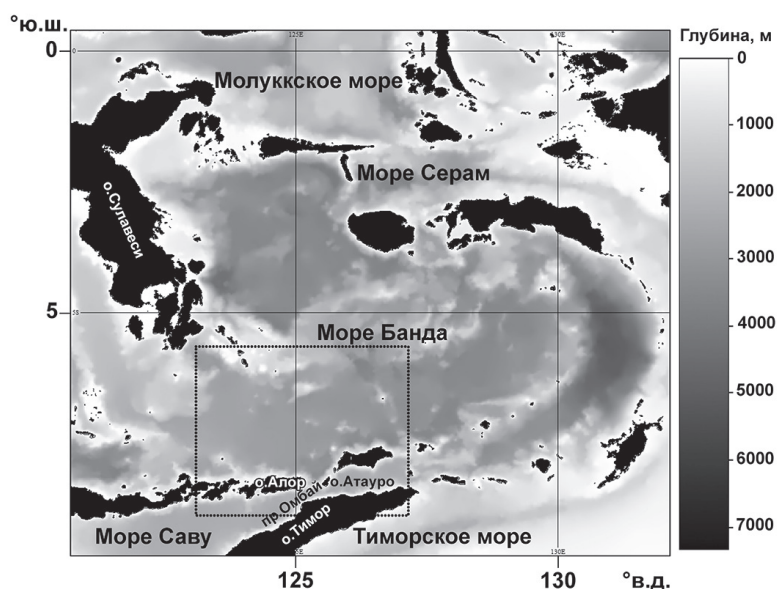


Рис. 1. Батиметрия моря Банда и окружающих его морей. Прямоугольник на рисунке — границы изображения РСА (рис. 3, а)

Fig. 1. Bathymetry of the Banda Sea and surrounding seas. The rectangle at fig is the boundaries of the SAR image (Fig. 3, a)

Расположенное в юго-восточной части Индийского океана, море Банда является окраинным морем, соединенным с Индийским океаном через Тиморский пролив и пролив Омбай (рис. 1). Последний пролив, будучи достаточно мелководным и узким, чрезвычайно благоприятен для возбуждения ВПБ под действием астрономического прилива Индийского океана. При анализе его спутниковых снимков было установлено, что ВПБ излучаются из пролива Омбай с периодичностью приливной гармоники M_2 и распространяются по всему морю Банда. ВПБ обычно выглядят, как волновые пакеты, состоящие из 5–6 солитоноподобных волн с лидирующими солитонами в пакетах, скорость которых изменяются в интервале 2–3 м/с в зависимости от направления распространения [38].

3. Кинематические параметры внутренних волн с приливными частотами

Внутренние гравитационные волны на приливных частотах (ВПВ) повсеместно регистрируются в Мировом океане. Кинематические параметры ВПВ: длина волны, λ_t , фазовая скорость, c_0 , дисперсия, β , и квадратичная нелинейность, α , детерминирована, главным образом, характеристиками плотностной стратификации океанических вод: глубиной залегания сезонного пикноклина, $z_{\max}$, значением частоты плавучести на этой глубине, $N_{\max}$ и его ширины / мощности Q , перепадом глубин между значениями частоты плавучести равными $\approx 0,5 N_{\max}$. Для оценки перечисленных характеристик частоты плавучести воспользуемся климатическим профилем плотности в море Банда, заимствованным из работы [34] (рис. 2). Соответствующая этому профилю частота плавучести $N_0^2 = (g/\rho_0(z))(-d\rho_0/dz)$, где ρ_0 — климатический профиль плотности, аппроксимировалась трёхпараметрической зависимостью вида:

$$N_0(z) = N_m \left\{ a[\zeta + b]^2 + 1 \right\}^{-1},$$

где a и b — константы, зависящие от характеристик профиля $N_0(z)$: $a = (2 H_b/Q)^2$, $b = z_{\max}/H_b$, $\zeta = z/H_b$, H_b — глубина «жидкого дна», на котором $N_0(z)$ равна частоте исследуемой ВВ, например, ВВ с приливной частотой $\omega_t = 2\pi/12,4$ (рад/ч), то есть $N(z = -H_t) \approx \omega_t$. Определим этот горизонт для моря Банда, воспользовавшись полученным соотношением. Выполнив ряд преобразований, получим для этого горизонта:

$$H_t = H \left\{ \left[\left(N_m \omega_t^{-1} \right) - 1 \right]^{1/2} a^{-1/2} - b \right\}.$$

Расчёт H_t показывает, что при средней глубине по трассе ~ 4 км, $z_{\max} \sim 200$ м, $Q \sim 300$ м и $N_m \sim 11$ –12 цикл/ч глубина «жидкого дна» для приливной частоты ω_t в море Банда, составляет 1,5–1,6 км.

Оценим кинематические характеристики внутренних волн с частотой приливной гармоники M_2 . Полусуточный прилив возбуждает ВПВ с длиной λ_t , равной минимальному собственному значению $k_1 = 2\pi/\lambda_t$ краевой задачи Штурма-Лиувилля [17]:

$$\frac{d^2}{dz^2} \phi_1(z) + (k_1/\omega_t)^2 N_0^2(z) \phi_1(z) = 0, \quad (1)$$

$$\phi_1(0) = \phi_1(-H_t) = 0, \quad (2)$$

здесь координата z направлена по вертикали против силы тяжести, H_t — глубина водоёма, на которой частота плавучести N_0 равна приливной частоте ω_t , $\phi_1(z)$ — амплитудная функция первой моды, нормированная на максимальное значение.

Для определения длины внутренней приливной волны λ_t в море Банда краевая задача (1), (2) с климатическим профилем плотности решена численно с помощью программного кода из [39]. В результате расчёта длина ВПВ низшей моды, составила ≈ 100 км, что на порядок больше глубины моря Банда. Очевидно, что для этой моды ВПВ море Банда является мелким.

По определению квадратичная нелинейность α и дисперсия β нелинейных внутренних волн рассчитываются по формулам из [40]:

$$\alpha = \left(\frac{3}{2} c_0 \int_{-H_t}^0 (d\phi/dz)^3 dz \right) \left(\int_{-H_t}^0 (d\phi/dz)^2 dz \right)^{-1},$$

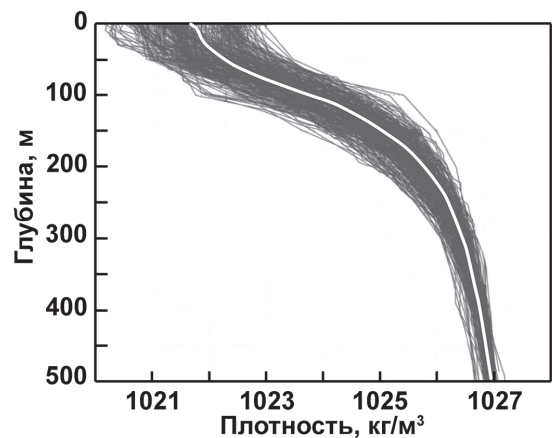


Рис. 2. Стратификация плотности в море Банда (изменённый рис. 4 из [34]). Белая линия — средний климатический профиль плотности в верхнем 500-м слое

Fig. 2. Density stratification in the Banda Sea (modified Fig. 4 from [34]). The white line is the average climatic density profile in the upper 500-meter layer

$$\beta = \left(\frac{1}{2} c_0 \int_{-H_i}^0 (\phi)^2 dz \right) \left(\int_{-H_i}^0 (d\phi/dz)^2 dz \right)^{-1}. \quad (3)$$

С использованием первой собственной функции, ϕ_1 , краевой задачи (1), (2) и взятия квадратур (3) были получены следующие значения кинематических параметров приливных ВВ в море Банда: фазовая скорость $c_0 \approx 2,2 \text{ м с}^{-1}$, дисперсия $\beta \approx 2,3 \times 10^5 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ и квадратичная нелинейность $\alpha \approx 2,9 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Искомые параметры характеризуют климатический фон моря, по которому распространяются ВПВ и, в том числе, приливные внутренние боры. В последующем рассмотрении нам также потребуется значение производной от собственной функции $d\phi_1/dz$ при $z = 0$, которое составило $\approx 0,02$.

В море Банда в течение всего года ВВ регистрируются на спутниковых изображениях, полученных в видимом диапазоне и радиолокационными станциями с синтезированной апертурой. В работе использовались РСА-изображения со спутников Envisat (ширина полосы съёмки 400 км, размер пикселя $75 \times 75 \text{ м}$; 2002–2012 гг.; 3 изображения) и ERS-2 (100 км и $12,5 \times 12,5 \text{ м}$; 1995–2011 гг.; 18 изображений), а также измерения, полученные в видимом диапазоне спектрометрическим MODIS (спутники Terra и Aqua, полоса съёмки 2400 км, разрешение $250 \times 250 \text{ м}$; 2002–2020 гг.; 3 пары изображений) и Advanced Himawari Imager (АНИ) с геостационарного спутника Himawari 8 (разрешение 0,5–1,0 км; 29.10.2015; 16 изображений). Скорости солитонов рассчитывались двумя методами: методом маркеров по парам изображений, принятых с интервалом 10–175 мин и по расстояниям между солитонами, лидирующими в соседних борях, в предположении, что боры возбуждаются с частотой 1/12,4 цикл/ч.

Из анализа спутниковых данных следует, что ВВ генерируются в результате взаимодействия приливной волны с порогом между островами Алор и Атауро в проливе Омбай. Пакеты ВВ, распространяющиеся в этом море на север, имеют канонический вид упорядоченных по амплитуде нелинейных волн [38].

На рис. 3 показаны пакеты ВВ на изображениях, полученных: а) РСА ASAR со спутника Envisat 18 апреля 2003 г.; б) АНИ в видимом диапазоне со спутника Himawari-8 29 октября 2015 г. Пакеты ВВ отчётливо

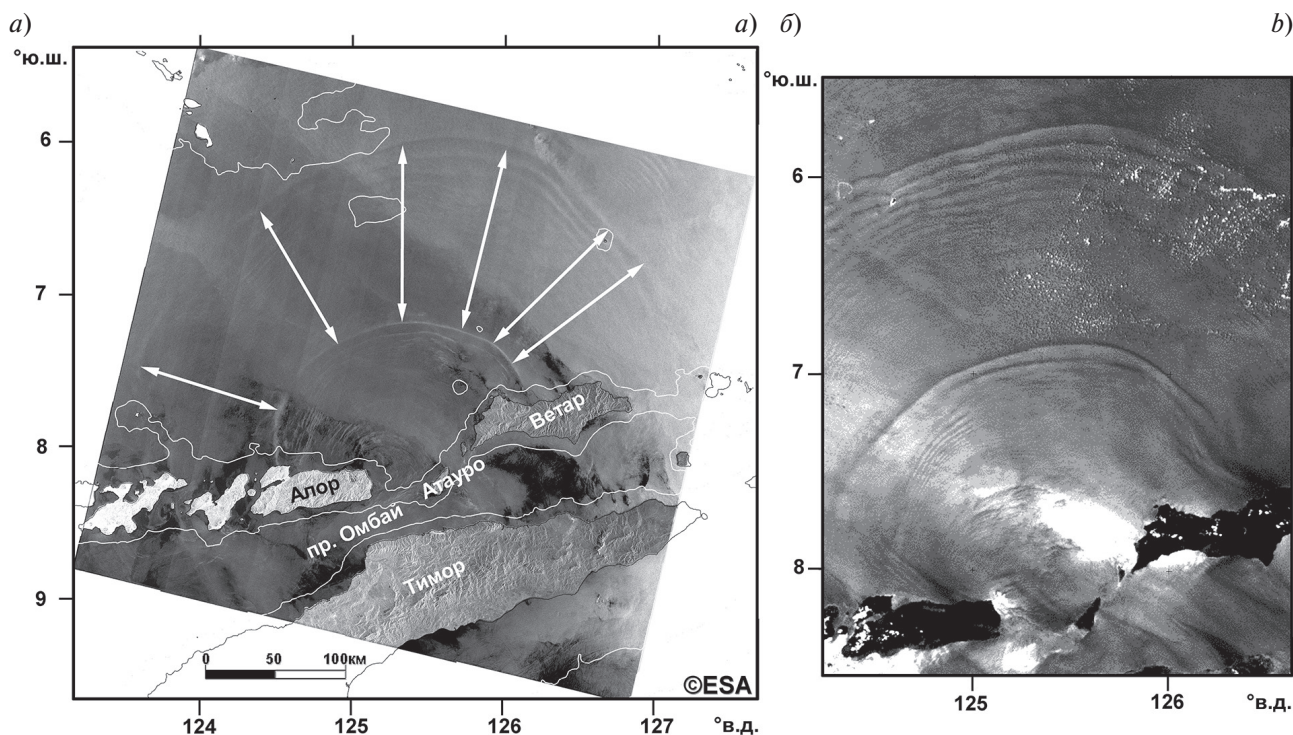


Рис. 3. Поверхностные проявления солитоноподобных внутренних волн, генерируемых порогом между островами Алор и Ветар и распространяющихся в море Банда, на изображениях, полученных в 01:18 UTC 18 апреля 2003 г. со спутника Envisat (показана изобата 2000 м) (а) и в 05:30 Гр. 29 октября 2015 г. со спутника Himawari-8 (б). Белые стрелки показывают направления, для которых выполнена оценка скорости распространения ВВ

Fig. 3. Surface manifestations of the soliton-like internal waves generated by the sill between the islands of Alor and Vetar and propagating in the Banda Sea in images taken at 01:18 UTC April 18, 2003 from the Envisat satellite (2000 m isobath is shown) (a) and at 05:30 UTC October 29, 2015 from the Himawari-8 satellite (b). White arrows show the directions for which the estimate of the propagation velocity of internal waves was made

проявляются в пределах всей полосы обзора ASAR шириной 400 км. Длина нескольких гребней в пакетах превышает 350 км. Гребни солитонов образуют почти правильные полуокружности, ограниченные островами, хотя расстояние между разными точками на гребне и источником (порогом) не является постоянным, что можно объяснить различиями в фазовой скорости в разных направлениях. Максимальная длина лидирующей волны — солитона — составляет примерно 12–15 км. Из анализа спутниковых изображений с учетом полусуточного характера внутреннего прилива в море следует, что максимальная скорость лидирующих солитонов ВПБ варьируется от $\approx 2,2$ до 3,0 м/с [38].

Более точные оценки нелинейных скоростей лидирующих солитонов были определены при анализе нескольких пар изображений, полученных спектрометрическим MODIS со спутников Terra и Aqua в один и тот же день (28.10.2003; 24.02.2004; 26.08.2006; 30.09.2007; 16.10.2007) с разницей во времени примерно 175 мин. Скорости распространения приливного фронта ВВ в море Банда V_s были рассчитаны по лучевым траекториям (далее — по волновым трассам), ориентированным под различными углами к нулевому меридиану (белые стрелки на рис. 3, а).

4. Модель внутреннего приливного бора в мелком море

Хорошим приближением для описания внутренних приливных боров на пикноклине шельфовых зон океана и морей является уравнение Кортевега–де Вриза (далее для сокращения КдВ). Гидродинамическая интерпретация ВПБ в рамках этого приближения выполнена в работе [41]. Воспользуемся её результатами, чтобы получить выражения для оценки параметров определяющих эти ВПБ по спутниковым изображениям их поверхностных проявлений.

Для ВПБ фиксированной моды с длиной волны $\lambda \gg H_t$, где H_t — глубина залегания горизонта, на котором частота плавучести равна приливной частоте, то есть $\omega_t \sim N_0(z = -H_t)$ в рассматриваемом морском бассейне, стратифицированном по плотности, уравнение КдВ запишем в виде:

$$\frac{1}{c_0} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (4)$$

где $\eta(x, t)$ — вертикальное смещение пикноклина в бассейне, x — горизонтальная координата, t — время, c_0 — фазовая скорость длинных линейных внутренних волн, α, β — коэффициенты квадратичной нелинейности и высокочастотной дисперсии, соответственно.

Зададим вертикальные смещения пикноклина $\eta(x, t)$, вызванные низшей модой ВПБ, воспользовавшись аналитическим решением уравнения (4) в форме кноидальной (кнд) волны следующего вида:

$$\eta(x, t) = \eta_0 \left\{ 2dn_s^2 \left[k_0(x - Vt)/2 \right] - (1 - s^2) \right\} + \eta_m. \quad (5)$$

В этом выражении η_0 — амплитудный фактор ВПБ, dn_s^2 — эллиптическая функция Якоби с модулем s , заданным на интервале $0 < s < 1$, η_m — средний уровень, V — скорость кнд волны, $k_0/2$ — её эффективный пространственный масштаб. Согласно определению, волновое число k , скорость V и параметры s и k_0 выражаются через коэффициенты уравнения КдВ и амплитуду волны η_0 согласно соотношениям:

$$k = \frac{\pi}{2} k_0 K^{-1}(s), \quad V = c_0 + \frac{1 + s^2}{3} \alpha \eta_0, \quad s^2 = \frac{(\alpha \eta_0 / 6)}{(\beta k_0^2 / 2)}, \quad \frac{1}{2} k_0 = \sqrt{\frac{\alpha}{6\beta}} \eta_0^{1/2}. \quad (6)$$

В (6) параметр s^2 характеризует нелинейные свойства кнд волны. Когда параметр s^2 близок к единице, значения нелинейного и дисперсионного слагаемых в уравнении КдВ одного порядка. Отдельные пульсации кнд волны при перемещении на большом расстоянии друг от друга принимают известную форму $\text{sech}^2(\xi)$. В случае $s^2 \ll 1$ из его определения следует, что доминирует дисперсия, эллиптические функции близки к тригонометрическим функциям и решение (5) переходит в решение линейной задачи, которое является суперпозицией гармоник с волновым числом k :

$$\eta(\xi) \sim \bar{\eta} + s^2 \left[\cos k\xi + \frac{1}{8} s^2 \cos 2k\xi + (s^6) \right],$$

где $\bar{\eta} = \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(\xi) d\xi$.

Проанализируем эволюцию пространственно-временной структуры ВПБ, воспользовавшись кнд решением (4) с начальным условием $\eta = \eta_0 H\nu(x)$, где $H\nu(x)$ — функция Хэвисайда. Для решения задачи

воспользуемся результатами работы [41], полагая, что параметр нелинейности s^2 кнд волны (5) есть медленная функция автомодельной переменной $\tau \equiv (x - c_0 t) / (\alpha \eta_0 c_0 t)$, η которая на интервале $-1 \leq \tau \leq 2/3$ удовлетворяет уравнению:

$$3\tau = \left(1 + s^2\right) - \left[2s^2(1 - s^2)K(s)\right] / \left[E(s) - (1 - s^2)K(s)\right]. \quad (7)$$

В выражениях (5) и (7) $K(s)$ и $E(s)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода, соответственно. Указанные соотношения дают асимптотически точное решение задачи о распаде начального скачка возвышения пикноклина при $t \rightarrow \infty$.

Анализ этих соотношений показывает, что вертикальные смещения пикноклина в заданный момент времени занимают в пространстве ограниченную область. На её передней границе $s^2 \rightarrow 1$, $k \rightarrow 1/\Delta_K$, а $dn_s(\chi) \rightarrow \text{sech}^2(\chi)$, другими словами, кнд волна (5) приобретает форму солитона с амплитудой $\eta_K = 2\eta_0$, скоростью V_K , полушириной Δ_K и волновым профилем $\sim \eta_K \text{sech}^2[(\chi - V_K t)/\Delta_K]$. При этом V_K и эффективная ширина солитона $L_K = 2\Delta_K$ связаны с коэффициентами уравнения (4) α , β и c_0 известными соотношениями: $V_K = c_0 + \alpha\eta_K/3$, $L_K = (24\beta/\alpha)\sqrt{\eta_K}$. Отсюда, как нетрудно заметить, амплитуду солитона можно оценить воспользовавшись одним из двух соотношений:

$$\eta_K^+ = 3(V_K - c_0)/\alpha; \quad \eta_K^- = 24(\beta/\alpha)L_K^{-2}. \quad (8)$$

Из (8) также следует, что амплитуда солитона связана однозначными зависимостями и с коэффициентами α , β и c_0 . Тем самым, выполнив измерения V_K и L_K , и предварительно определив α , β и c_0 с помощью соотношения (8), получим два возможных взаимно дополняющих способа определения амплитуды лидирующего солитона в приливном боре.

В тылу подобного бора $s \rightarrow 0$, $k \rightarrow k_0$, $V \rightarrow c_0$, кнд волна (5) коллапсирует к линейной волне, то есть $\eta(\xi) \sim s^2 \cos k_0 \xi$. В последнем выражении параметр k_0 связан известным соотношением с полушириной лидирующего солитона Δ_K , то есть $k_0 = 2\Delta_K^{-1}$. Принимая во внимание, что $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, имеем $\Delta_K = \lambda_0/\pi$. С учётом (6) для определения амплитуды указанного солитона получим ещё одно дополнительное выражение

$$\eta_K = 12(\beta/\alpha)(\pi/\lambda_0)^2. \quad (9)$$

Таким образом, амплитуда лидирующего солитона в приливном боре в море с параметрами гидрофизического фона α , β и c_0 может быть рассчитана с помощью соотношений (7) и (9), используя результаты анализа спутниковых изображений исследуемого бассейна, на которых запечатлены поверхностные проявления ВВ.

В теории формирования изображений морской поверхности определяющее значение отводится возмущениям скорости поверхностных течений $u(x, t)$, индуцированных солитонами ВПБ. Оценки указанных скоростей можно получить с помощью аналитического выражения следующего вида [41]:

$$u(x, t) \approx V_1(d\phi_1/dz)\eta(x, t) / [1 + (d\phi_1/dz)\eta(x, t)]. \quad (10)$$

В формуле (10) $(d\phi_1/dz)$ — производная от собственной функции первой моды краевой задачи (1), (2), рассчитанная при $z = 0$. Нетрудно показать, что в случае, когда $(d\phi_1/dz)\eta_0 \ll 1$, скорость горизонтального течения является малой по сравнению со скоростью лидирующего солитона в боре. В противоположном случае, когда $(d\phi_1/dz)\eta_0 \gg 1$, скорость поверхностного течения, индуцированного лидирующим солитонным бором, близка к скорости распространения V_1 , то есть величина фактора $\eta_0(d\phi_1/dz)$ может в этом случае выступать мерой нелинейности поверхностного течения.

К числу главных факторов, влияющих на эволюцию ВПБ в море Банда, помимо нелинейности и дисперсии, следует отнести цилиндрическую расходимость. Последний фактор наглядно проявляется на изображениях фронтов яркости, имеющих цилиндрическую форму. Выполним учёт этого фактора, добавив в левую часть уравнения (4) слагаемое вида $\eta/2r$. Это слагаемое задаёт расходимость цилиндрической квазиплоской волны вдали от центра её генерации. Подобным уравнением описывают волны, возбуждаемые осесимметричными локализованными возмущениями в океане, например, извержением подводных вулканов, включая возмущения, локализованные в узких проливах.

Полагая, что цилиндрическая расходимость на достаточно большом расстоянии от центра генерации достаточно мала, решение уравнения КдВ в каждый момент времени близко к солитонному решению $\eta = \eta_K \text{sech}^2[(r - V_K t)/\Delta_K]$, в котором амплитуда η_K и скорость V_K являются медленными функциями прой-

денного расстояния r . В этом случае эволюцию η_K и V_K можно рассчитать из уравнения баланса энергии [42]. Вычислим энергию солитона КдВ. Возводя η в квадрат и интегрируя по r в бесконечных пределах, получим сохраняющуюся величину, имеющую смысл энергии солитона КдВ:

$$\langle \eta^2/2 \rangle = (2/3)\eta_K^{3/2}\sqrt{12\beta/\alpha}.$$

Из условия сохранения потока энергии через замкнутую поверхность получим $r \langle \eta^2 \rangle = \text{const}$. Это соотношение позволяет учесть изменения амплитуды солитона с пройденным расстоянием. Асимптотическое выражение $\eta_K(r)$ для солитона КдВ примет следующий вид:

$$\eta_K(r) = \eta_0(r/r_0)^{-2/3}, \quad (11)$$

где η_0 — значение амплитуды солитона на заданном расстоянии от центра r_0 .

Согласно анализу «отпечатков» внутренних приливных боров на многочисленных РСА — изображениях индонезийских морей, а также измерений, полученных в видимом диапазоне радиометрами, следует, что проявления этих боров на морской поверхности представляют волновые пакеты, ранжированных по ширине гребней солитонов ВВ [38]. Полученные ранее характеристики приливных боров в море Банда: $A_1 \equiv \eta_0$, V_1 , L_1 и s_1 относятся к лидирующей волне, имеющей форму солитона КдВ с $s_1 = 1$. Целесообразно рассмотреть возможную схему определения характеристик кноидальных волн, следующих за лидирующим солитоном бора.

Рассмотрим в качестве примера волну, следующую за лидирующим солитоном. Для неё нелинейный параметр s_2 можно записать в виде $s_2^2 = s_1^2 A_2 / A_1$. Отсюда, учитывая, что $s_1 = 1$, для амплитуды искомой пульсации получим простое соотношение $A_2 = s_2^2 A_1$. В этом выражении неопределённым остаётся параметр s_2^2 , характеризующий её нелинейные свойства. Для определения s_2^2 воспользуемся следующей особенностью решения (5). Согласно теории кнд волн нелинейный параметр s_2^2 и соответствующая этой волне нелинейная длина волны λ_1 (расстояние между горбами/впадинами второй и первой пульсаций) связаны трансцендентным соотношением (см. соотношение (6)):

$$\lambda_1 = 2\lambda_0 K(s_2) / \pi, \quad (12)$$

где λ_0 — длина волны в тыловой зоне бора.

Для волн с номерами 2 и 3, близких к лидирующему солитону в боре, нелинейный параметр $s_n^2 \approx 1$. В этом случае выражение (12) принимает вид:

$$\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \approx \ln \left(\frac{16}{1 - s_2^2} \right).$$

Отсюда для оценки s_2^2 получаем приближённое соотношение:

$$s_2^2 \approx 1 - 16 \exp(-\pi \lambda_1 / \lambda_0). \quad (13)$$

Таким образом, для определения амплитуды волны с номером 2, следует предварительно определить с помощью (13) её параметр нелинейности s_2^2 и далее, воспользовавшись соотношением $A_2 = s_2^2 A_1$, найти искомую амплитуду. При этом предполагается, что нелинейный параметр лидирующей кнд волны равен единице, то есть $s_1^2 = 1$, а искомая кнд волна представляет собой солитон КдВ, движущийся со скоростью V_1 . По предложенному алгоритму можно определить амплитуду A_n и параметр нелинейности s_n последующих кноидальных пульсаций внутреннего приливного бора.

5. Обсуждение

Воспользуемся изложенной методикой для определения амплитуды лидирующего солитона ВПБ и скорости течений, индуцированных этим солитоном на морской поверхности, по изображению РСА со спутника ERS-2 (рис. 4, а). Вариации яркости изображения вдоль белой стрелки, характеризующиеся величиной удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) приведены на рис. 4, б. Чтобы воспользоваться соотношениями (9), (10) и (11), необходимо задать значения параметров c_0 , β и α , характеризующих гидрофизический фон, по которому распространяется приливной бор. Согласно (3), указанные параметры выражаются через решение краевой задачи на собственные значения (1), (2). В результате её решения были получены следующие значения параметров: $c_0 \approx 2,2 \text{ м/с}^{-1}$, $\beta \approx 2,3 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}^{-1}$ и $\alpha \approx 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

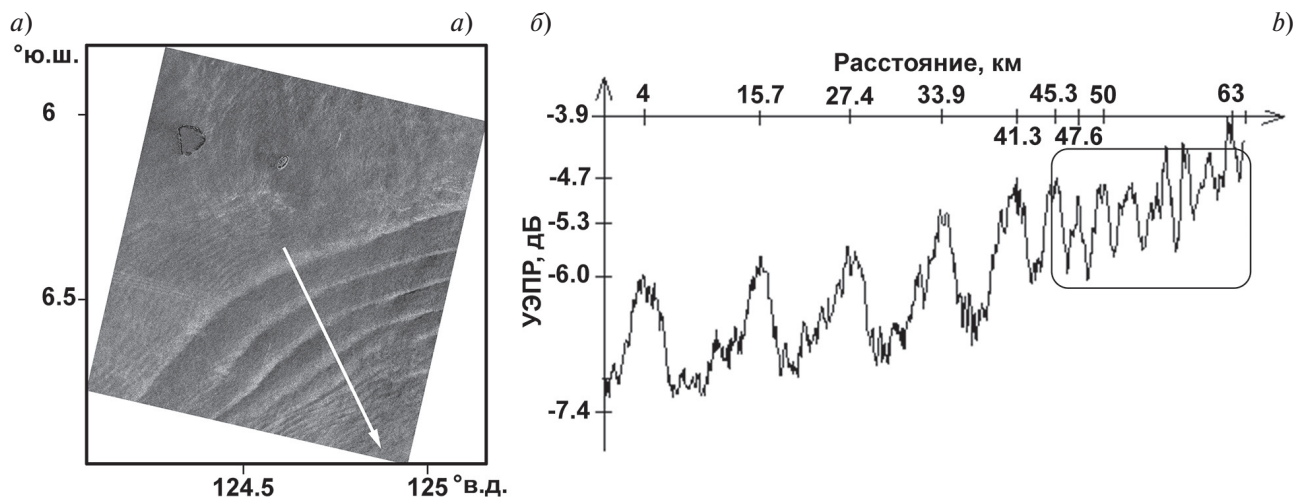


Рис. 4. Изображение PCA со спутника ERS-2, полученное в 01:57 UTC 18 октября 1997 г, с несколькими нелинейными солитонами и волнами в тыловой зоне бора (а), и вариации УЭПР вдоль белой стрелки (б). Прямоугольником выделена тыловая зона ВПБ

Fig. 4. ERS-2 SAR image acquired at 01:57 UTC on October 18, 1997, with several nonlinear solitons and waves in the rear bore zone (a) and the NRCS variations along the white arrow (b). The rear bore zone is marked with a rectangle

Учитывая полученные выше значения c_0 и α с помощью соотношения (8), мы получили оценку амплитуды A_1 лидирующего солитона ВПБ, движущегося со скоростями из интервала значений (2,9–3,1) м/с. В строке № 1 таблицы представлены эти значения A_1 . Из таблицы следует, что амплитуда A_1 лидирующего солитона приливного бора, движущегося со скоростью V_K в море с указанными кинематическими параметрами, изменяется в интервале 70–95 м, то есть может достигать значения ≈ 95 м.

В ряде работ для оценки амплитуды солитона используется зависимость его амплитуды от эффективной ширины L_K . Эта зависимость имеет вид (8). В строке № 2 таблицы показаны значения амплитуды в зависимости от значений L_K . Из обработки спутниковых изображений (рис. 3) следует, что эффективная ширина лидирующего солитона составила $2,1 \pm 0,2$ км. Согласно расчётам, этим значениям L_K соответствуют амплитуды от 70 до 95 м (см. строку № 3). В этом случае амплитуда лидирующего солитона принимает значения близкие к значениям, представленным в первой строке таблицы.

Ещё один способ оценки амплитуды солитона по спутниковым данным основывается на зависимости между его амплитудой и длиной волны λ_0 в тылу ВПБ (9). Для определения λ_0 рассмотрим тыловую зону ВПБ (рис. 4). Длина волны в этой зоне бора меняется незначительно (рис. 4). Приблизённо значения λ_0 лежат в интервале 3,2–3,6 км, что даёт значения амплитуды от 70 до 90 м (см. строку № 5 таблицы), хорошо соответствующие значениям в строках № 1 и № 2.

Из таблицы также следует, что средние значения амплитуд лидирующих солитонов в море Банда, рассчитанные с использованием значений скорости и эффективной ширины солитона, а также длины волны в тыловой зоне бора, полученных из анализа PCA — изображений со спутников Envisat и ERS-1, составили

Таблица
Table

Значения амплитуды лидирующего солитона ВПБ в зависимости от его скорости, эффективной ширины и длины волны в его тыловой зоне

The values of the ITB amplitude of the leading soliton depending on its velocity, effective width, and wavelength in its rear zone

№	Скорость V_K , м/с	2,9	3,0	3,1
1	Амплитуда η_K^+ м	70	85	95
2	Эф. ширина L_K км	2,0	2,2	2,3
3	Амплитуда η_K^- м	70	80	95
4	Длина волны λ_0 км	3,2	3,4	3,6
5	Амплитуда η_K м	90	80	70

83 м, 82 м и 80 м, соответственно. Таким образом, оценка среднего значения амплитуды лидирующего солитона ВПБ в море Банда, рассчитанное тремя рассмотренными методами, составляет ~ 82 м. Абсолютная и относительная погрешности оценки составили ≈ 8 м, $\approx 10\%$ соответственно.

Оценим скорости поверхностных течений, индуцированных лидирующим солитоном ВПБ в море Банда. Значение $d\phi_1/dz$, рассчитанное при $z = 0$, составило $\approx 0,02$, а скорость этого солитона $V_s \approx 3$ м/с. Воспользовавшись соотношением (10) для скорости поверхностных течений, получим оценку $u_0 \approx 1,6$ м/с. Полученное значение составляет $\approx 50\%$ от V_1 , что указывает на значительную нелинейность течений, индуцированных лидирующим солитоном внутреннего приливного бора в море Банда.

Рассмотрим влияние цилиндрической расходимости на эволюцию ВПБ в море Банда. Допустим, что солитон с амплитудой η_1 и скоростью V_1 в начальный момент времени находится на расстоянии r_1 от зоны генерации. При его перемещении в соседнюю точку r_2 , его амплитуда за счёт расходимости, вызванной цилиндрической формой приливного фронта, уменьшится до значения η_2 . Искомое значение η_2 , в соответствии с выражением (5), равно $\eta_2(r_2) = \eta_1(r_2/r_1)^{-2/3}$. Учитывая, что амплитуда солитона связана с его скоростью соотношением (6), нетрудно получить выражение для изменения скорости солитона при изменении его амплитуды: $\varepsilon_\eta \equiv (\eta_1 - \eta_2)/\eta_1$ и скорости $\varepsilon_V \equiv (V_1 - V_2)/V_1$ лидирующего солитона в море Банда, где $\eta_1 \approx 80$ м, $V_1 \approx 3$ мс $^{-1}$ при пройденном расстоянии $r_2 = 2r_1$ составит: $\varepsilon_\eta \approx 35\%$ от η_1 , а $\varepsilon_V \approx 25\%$ ($0,75$ мс $^{-1}$).

Определим амплитуду A_2 волны, следующей за лидирующим солитоном с амплитудой A_1 , воспользовавшись соотношением $A_2 = s_2^2 A_1$. С этой целью оценим нелинейный параметр s_2^2 , характеризующий эту волну. Для оценки s_2^2 воспользуемся соотношением (13), в котором длина кнд волны λ_1 , соответствует второй волне. Для рассматриваемого ВПБ $\lambda_1 \approx 10$ км (рис. 3). Расчет s_2^2 с этим значением λ_1 даёт $s_2^2 \approx 0,997$. С учётом полученных значений s_2^2 и $A_1 \approx 80$ м для амплитуды кнд волны, следующей за лидирующим солитоном, получим оценку $A_2 \approx 79,5$ м, то есть значение близкое к A_1 , как и следует из анализа спутникового изображения.

В заключение сформулированы основные результаты работы. В статье с использованием кноидальной модели внутренних приливных боров, расширенной за счёт включения в неё цилиндрической расходимости, предложена методика определения морфометрических характеристик подобных боров в морских бассейнах с заданными параметрами гидрофизического фона среды: квадратичной нелинейности α , дисперсии β и фазовой скорости внутренних волн с приливной частотой. Для моря Банда значения указанных параметров α , β , и c_0 , рассчитанные по данным климатического профиля частоты плавучести, составили $\approx 2,9 \times 10^{-2}$ с $^{-1}$, $\approx 2,3 \times 10^5$ м 3 с $^{-1}$, $\approx 2,2$ мс $^{-1}$, соответственно.

По изображениям поверхностных проявлений внутренних приливных боров, полученных РСА со спутников Envisat и ERS-2, было найдено, что нелинейные длины волн (расстояние между соседними гребнями/впадинами) $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_0$ составляют $\lambda_1 \sim 10$ км, $\lambda_0 \in (3,2-3,6)$ км, максимальная скорость лидирующего солитона $V_1 \in (2,9-3,1)$ мс $^{-1}$ и его эффективная ширина $L_1 \in (2,0-2,3)$ км.

Использование предложенной методики определения характеристик приливных боров в море Банда показало, что лидирующий солитон КдВ распространяется с нелинейной скоростью $V_K \equiv V_1 \approx 3$ мс $^{-1}$, его амплитуда $A_1 \approx 80$ м, нелинейный параметр s_1 близок к 1, а горизонтальная скорость течений на морской поверхности, индуцированных этим солитоном $U_K \approx 1,6$ мс $^{-1}$. Следующая за этим солитоном кноидальная волна имеет нелинейный параметр $s_2 = 0,997$ близкий, но не равный s_1 и, как следствие, близкую к A_1 амплитуду $A_2 \approx 79,6$ м. Замыкают приливной бор квазигармонические колебания со средней длиной волны $\lambda_0 \approx 3,4$ км.

Из анализа спутниковых радиолокационных изображений и изображений в видимом диапазоне следует, что приливные боры в море Банда трансформируются под действием не только нелинейности и дисперсии, но и цилиндрической расходимости. В рамках кноидальной модели приливного бора показано, что энергия его лидирующей и последующих волн затухает в процессе эволюции за счёт цилиндрической расходимости, что, в свою очередь, приводит к падению скорости распространения. Расчёты показывают, что при прохождении солитоном расстояния, которое он преодолевает за время равное удвоенному приливному периоду, его амплитуда падает на 35 %, а скорость на 25 % относительно начальных значений этих характеристик.

6. Выводы

Показано, что амплитуды уединённых внутренних волн в стратифицированном по плотности мелком море с заданными квадратичной нелинейностью α , дисперсией β , и фазовой скоростью линейных длинных внутренних волн c_0 , связаны однозначными зависимостями с характеристиками пространственно-временной

структуры приливных внутренних волновых боров: скоростью лидирующих солитонов в таких борах, а также длин волн в их тыловой зоне. Получена оценка амплитуды лидирующего солитона внутреннего приливного бора в море Банда $Am_s \approx 8$ м в предположении, что боры распространяются в среде с известными значениями кинематических параметров α , β и c_0 . Данные об амплитудах лидирующих солитонов в приливных борах в этом море отсутствуют, можно, однако, предположить, что они близки к измеренным амплитудам солитонов, генерируемых приливами над поднятиями дна в проливе Ломбок [43], а также в проливах индонезийских морей Сулу, Сулавеси и др. [31–33, 44]. Данное исследование, по-видимому, является первым, в котором оценка амплитуд солитонов внутренних волн и скоростей течений, индуцированных ими на морской поверхности, получена при анализе спутниковых изображений внутренних приливных боров в исследуемой акватории.

Таким образом, предложенная в настоящей статье методика расчёта морфометрических характеристик внутренних приливных боров, основанная на кноидальном решении уравнения КдВ и спутниковых изображениях представляется многообещающим инструментом для исследования особенностей процесса эволюции внутренних приливных боров в индонезийских морях.

Финансирование

Обработка и анализ спутниковых данных выполнена по госбюджетной тематике ТОИ ДВО РАН «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере» (рег. № 0211–2021–0007), вывод соотношений для определения динамических характеристик внутренних приливных боров, анализ полученных данных и их интерпретация выполнены по теме «Математическое моделирование и анализ динамических процессов в океане» (рег. № 0271–2019–0001). Авторы благодарят анонимных рецензентов за содержательные рекомендации и полезные комментарии.

Funding

The satellite data processing and analysis was carried out on the State budget Theme of the Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences “Technologies for remote sensing of the Earth and ground-based measuring systems in complex studies of dynamic phenomena in the ocean and atmosphere” (registration No. 0211-2021-0007), derivation of relations for determination of the dynamic characteristics of internal tidal bores, the analysis of the obtained data and their interpretation were carried out on the Theme “Mathematical modeling and analysis of dynamic processes in the ocean” (reg. No. 0271-2019-0001). The authors would like to thank the anonymous reviewers for their thoughtful recommendations and helpful comments.

Литература

1. *Apel J.R., Holbrook J.R., Liu A.K., Tsai J.J.* The Sulu Sea internal soliton experiment // *Journal of Physical Oceanography*. 1985. V. 15, Iss. 12. P. 1625–1651. doi:10.1175/1520-0485(1985)015<1625:TSSISE>2.0.CO;2
2. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2017. V. 9, Iss. 9. 892. doi:10.3390/rs9090892
3. *Magalhaes J.M., Da Silva J.C.B.* Internal solitary waves in the Andaman Sea: New insights from SAR imagery // *Remote Sensing*. 2018. V. 10, Iss. 6. 861. doi:10.3390/rs10060861
4. *Liang J., Li X.-M., Sha J., Jia T., Ren Y.* The lifecycle of nonlinear internal waves in the northwestern South China Sea // *Journal of Physical Oceanography*. 2019. V. 49, Iss. 8. P. 2133–2145. doi:10.1175/JPO-D-18-0231.1
5. *Sandstrom H., Elliott J.A.* Internal tide and solitons on the Scotian Shelf: A nutrient pump at work // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1984. V. 89, Iss. C4. P. 6415–6426. doi:10.1029/JC089IC04P06415
6. *Nash J.D., Shroyer E.L., Kelly S.M., Inall M.E., Duda T.F., Levine M.D., Jones N.L., Musgrave R.C.* Are any coastal internal tides predictable? // *Oceanography*. 2012. V. 25, N2. P. 80–95. doi:10.5670/oceanog.2012.44
7. *Osborne A.R., Burch T.L., Scarlet R.I.* The influence of internal waves on deep-water drilling // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1978. V. 30, Iss. 10. P. 1497–1504. doi:10.4043/2797-MS
8. *Horne E., Beckebanze F., Micard D., Odier P., Maas L.R.M., Joubaud S.* Particle transport induced by internal wave beam streaming in lateral boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. V. 870. P. 848–869. doi:10.1017/jfm.2019.251
9. *Chiu C.S., Ramp S.R., Miller C.W., Lynch J.F., Duda T.F., Tang T.Y.* Acoustic intensity fluctuations induced by South China Sea internal tides and solitons // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004. V. 29. P. 1249–1263. doi:10.1109/JOE.2004.834173

10. Woodson C.B. The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems // Annual Review of Marine Science. 2018. V. 10. P. 421–441. doi:10.1146/annurev-marine-121916-063619
11. Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves // Nature. 1985. V. 314. P. 245–247. doi:10.1038/314245a0
12. Jackson C.R., Da Silva J.C.B., Jeans G., Alpers W., Caruso M.J. Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery // Oceanography. 2013. V. 26. P. 68–79. doi:10.5670/oceanog.2013.32
13. Porter D.L., Thompson D.R. Continental shelf parameters inferred from SAR internal wave observations // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1999. V. 16. P. 475–487. doi:10.1175/1520-0426(1999)016<0475: CSPIFS>2.0.CO;2
14. Fan K., Fu B., Gu Y., Yu X., Liu T., Shi A., Xu K., Gan X. Internal wave parameters retrieval from space-borne SAR image // Frontiers in Earth Science. 2015. V. 9. P. 700–708. doi:10.1007/s11707-015-0506-7
15. Wang J., Yang J., Li J., Ren L., Zheng G. Study on extracting and verifying internal wave parameter of SAR image // Proc. SPIE V. 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. Toulouse, France. doi:10.1117/12.2194768
16. Romeiser R., Graber H.C. Advanced remote sensing of internal waves by spaceborne along-track InSAR-A demonstration with TerraSAR-X // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. P. 6735–6751. doi:10.1109/TGRS.2015.2447547
17. Мирополюский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 302 с.
18. Wang C., Wang X., Da Silva J.C.B. Studies of internal waves in the strait of Georgia based on remote sensing images // Remote Sensing. 2019. V. 11, Iss. 1. 96. doi:10.3390/rs11010096
19. Small J., Hallock Z., Pavey G., Scott J. Observations of large amplitude internal waves at the Malin Shelf edge during SESAME1995 // Continental Shelf Research. 1999. V. 19. P. 1389–1436. doi:10.1016/S0278-4343(99)00023-0
20. Pan J., Jay D.A., Orton P.M. Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2007. V. 112, Iss. C7. C07014. DOI:10.1029/2006JC003688
21. Константинов О.Г., Новотрясов В.В. Поверхностные проявления внутренних волн по данным видеосистемы берегового базирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 364–369. doi:10.7868/S0002351513030097
22. Zheng Q., Yuan Y., Klemas V., Yan X. Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2001. V. 106. P. 31415–31423. doi:10.1029/2000JC000726
23. Xue J., Graber H.C., Lund B., Romeiser R. Amplitudes estimation of large internal solitary waves in the Mid-Atlantic Bight using synthetic aperture radar and marine X-band radar images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. P. 3250–3258. doi:10.1109/TGRS.2012.2221467
24. Hong D.-B., Yang C.-S., Ouchi K. Preliminary study of internal solitary wave amplitude off the East coast of Korea based on synthetic aperture radar data // Journal of Marine Science and Technology. 2016. V. 24, N 6. P. 1194–1203. doi:10.6119/JMST-016-1026-8
25. Benjamin T.B. Internal waves of finite amplitude and permanent form // Journal of Fluid Mechanics. 1966. V. 25. P. 241–270. doi:10.1017/S00222112066001630
26. Benney D.J. Long non-linear waves in fluid flows // Journal of Mathematical Physics. 1966. V. 45. P. 52–63. doi:10.1002/sapm196645152
27. Joseph R.I. Solitary waves in a finite depth fluid // Journal of Physics A Mathematical and General. 1977. V. 10, N 12. L225. doi:10.1088/0305-4470/10/12/002
28. Kubota T., Ko D.R.S., Dobbs L. Propagation of weakly nonlinear internal waves in a stratified fluid of finite depth // Journal of Hydronautics. 1978. V. 12. P. 157–165. doi:10.2514/3.63127
29. Benjamin T.B. Internal waves of permanent form in fluids of great depth // Journal of Fluid Mechanics. 1967. V. 29. P. 559–592. doi:10.1017/S0022211206700103X
30. Ono H. Algebraic solitary waves in stratified fluids // Journal of the Physical Society of Japan. 1975. V. 39. P. 1082–1091. doi:10.1143/JPSJ.39.1082
31. Alpers W., Mitnik L.M., Hock L., Chen K.-S. ERS SAR views the tropical and subtropical ocean <http://earth.esa.int/application/ERS-SARTropical> (дата обращения: 29.05.2022).
32. Jackson Ch.R. An atlas of Internal solitary-like waves and their properties. Second Ed. Alexandria, USA: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: <https://www.internalwaveatlas.com> (дата обращения: 29.05.2022).
33. Apel J.R. Oceanic Internal Waves and Solitons // An Atlas of Oceanic Internal Solitary Waves (May 2002). Oceanic Internal Waves and Solitons by Global Ocean Associates. Prepared for Office of Naval Research — Code 322 PO
34. Gordon A., Susanto D. Banda Sea surface layer divergence // Ocean Dynamics. 2001. V. 52. P. 2–10. doi:10.1007/s10236-001-8172-6

35. Moore T.S. II, Marra J., Alkatiri A. Response of the Banda Sea to the southeast monsoon // *Marine Ecology Progress Series*. 2003. V. 261. P. 41–49. doi:10.3354/meps261041
36. Wawaruntu J., Fine R., Olson A.L., Gordon A.L. Recipe for Banda Sea Water // *Journal of Marine Research*. 2000. V. 58, N4. P. 547–569. doi:10.1357/002224000321511016
37. Liang L., Xue H., Shu Y. The Indonesian throughflow and the circulation in the Banda Sea: A modeling study // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. P. 3089–3106. doi:10.1029/2018JC014926
38. Mitnik L., Dubina V. Non-linear internal waves in the Banda Sea on satellite synthetic aperture radar and visible images // *Proceedings IGARSS'09, Cape Town, 2009*. С. 4788–4791. doi:10.1109/IGARSS.2009.5417914
39. Новотрясов В.В. Дисперсионные зависимости и вертикальная структура внутренних гравитационных волн на сдвиговом течении // *Океанология*. 1991. Т. 31, Вып. 6. С. 885–891.
40. Островский Л.А. Нелинейные внутренние волны во вращающемся океане // *Океанология*. 1978. Т. 18, Вып. 2. С. 181–191.
41. Apel J.R. A new analytical model for internal solitons in the ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. V. 33. P. 2247–2269. doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2247: ANAMFI>2.0.CO;2
42. Степанянц Ю.А. Диссипация солитонов внутренних волн при цилиндрической расходимости // *Известия АН СССР Физика атмосферы и океана*. 1981. Т. 17, № 8. С. 660–661.
43. Susanto R.D., Mitnik L., Zheng Q. Ocean internal waves observed in the *Lombok Strait* // *Oceanography*. 2005. V. 18, N 4. P. 80–87. doi:10.5670/oceanog.2005.08
44. Jackson Ch.R., da Silva J.C.B., Jeans G. The generation of nonlinear internal waves // *Oceanography*. 2012. V. 25, N 2. P. 108–123. doi:10.5670/oceanog.2012.46

References

1. Apel J.R., Holbrook J.R., Liu, A.K., Tsai J.J. The Sulu Sea internal soliton experiment. *Journal of Physical Oceanography*. 1985, 15, 12, 1625–1651. doi:10.1175/1520-0485(1985)015<1625: TSSISE>2.0.CO;2
2. Lavrova O., Mityagina M. Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas. *Remote Sensing*. 2017, 9, 9, 892. doi:10.3390/rs9090892
3. Magalhaes J.M., Da Silva J.C.B. Internal solitary waves in the Andaman Sea: New insights from SAR imagery. *Remote Sensing*. 2018, 10, 6, 861. doi:10.3390/rs10060861
4. Liang J., Li X.-M., Sha J., Jia T., Ren Y. The lifecycle of nonlinear internal waves in the northwestern South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*. 2019, 49, 8, 2133–2145. doi:10.1175/JPO-D-18-0231.1
5. Sandstrom H., Elliott J.A. Internal tide and solitons on the Scotian Shelf: A nutrient pump at work. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1984, C4, 6415–6426. doi:10.1029/JC089IC04P06415
6. Nash J.D., Shroyer E.L., Kelly S.M., Inall M.E., Duda T.F., Levine M.D., Jones N.L., Musgrave R.C. Are any coastal internal tides predictable? *Oceanography*. 2012, 25, 2, 80–95. doi:10.5670/oceanog.2012.44
7. Osborne A.R., Burch T.L., Scarlet R.I. The influence of internal waves on deep-water drilling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1978, 30, 10, 1497–1504. doi:10.4043/2797-MS
8. Horne E., Beckebanze F., Micard D., Odier P., Maas L.R.M., Joubaud S. Particle transport induced by internal wave beam streaming in lateral boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019, 870, 848–869. doi:10.1017/jfm.2019.251
9. Chiu C.S., Ramp S.R., Miller C.W., Lynch J.F., Duda T.F., Tang T.Y. Acoustic intensity fluctuations induced by South China Sea internal tides and solitons. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004, 29, 1249–1263. doi:10.1109/JOE.2004.834173
10. Woodson C.B. The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. *Annual Review of Marine Science*. 2018, 10, 421–441. doi:10.1146/annurev-marine-121916-063619
11. Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves. *Nature*. 1985, 314, 245–247. doi:10.1038/314245a0
12. Jackson C.R., Da Silva J.C.B., Jeans G., Alpers W., Caruso M.J. Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery. *Oceanography*. 2013, 26, 68–79. doi:10.5670/oceanog.2013.32
13. Porter D.L., Thompson D.R. Continental shelf parameters inferred from SAR internal wave observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999, 16, 475–487. doi:10.1175/1520-0426(1999)016<0475: CSPIFS>2.0.CO;2
14. Fan K., Fu B., Gu Y., Yu X., Liu T., Shi A., Xu K., Gan X. Internal wave parameters retrieval from space-borne SAR image. *Frontiers in Earth Science*. 2015, 700–708. doi:10.1007/s11707-015-0506-7
15. Wang J., Yang J., Li J., Ren L., Zheng G. Study on extracting and verifying internal wave parameter of SAR image. *Proc. SPIE V. 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. Toulouse, France*. doi:10.1117/12.2194768

16. Romeiser R., Graber H.C. Advanced remote sensing of internal waves by spaceborne along-track InSAR-A demonstration with TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015, 53, 6735–6751. doi:10.1109/TGRS.2015.2447547
17. Miropolsky Yu.Z. Dynamics of internal gravity waves in the ocean. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1981, 302 p. (in Russian).
18. Wang C., Wang X., Da Silva J.C.B. Studies of internal waves in the strait of Georgia based on remote sensing images. *Remote Sensing*. 2019, 11, 1, 96. doi:10.3390/rs11010096
19. Small J., Hallock Z., Pavey G., Scott J. Observations of large amplitude internal waves at the Malin Shelf edge during SESAME1995. *Continental Shelf Research*. 1999, 19, 1389–1436. doi:10.1016/S0278-4343(99)00023-0
20. Pan J., Jay D.A., Orton P.M. Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007, 112, C7, C07014. doi:10.1029/2006JC003688
21. Konstantinov O.G., Novotryasov V.V. Surface manifestations of internal waves observed using a land-based video system. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013, 49, 3, 334–338. doi:10.1134/S0001433813030092
22. Zheng Q., Yuan Y., Klemas V., Yan, X. Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001, 106, 31415–31423. doi:10.1029/2000JC000726
23. Xue J., Graber H.C., Lund B., Romeiser R. Amplitudes estimation of large internal solitary waves in the Mid-Atlantic Bight using synthetic aperture radar and marine X-band radar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013, 51, 3250–3258. doi:10.1109/TGRS.2012.2221467
24. Hong D.-B., Yang C.-S., Ouchi K. Preliminary study of internal solitary wave amplitude off the East coast of Korea based on synthetic aperture radar data. *Journal of Marine Science and Technology*. 2016, 24, 6, 1194–1203. doi:10.6119/JMST-016–1026–8
25. Benjamin T.B. Internal waves of finite amplitude and permanent form. *Journal of Fluid Mechanics*. 1966, 25, 241–270. doi:10.1017/S0022112066001630
26. Benney D.J. Long non-linear waves in fluid flows. *Journal of Mathematical Physics*. 1966, 45, 52–63. doi:10.1002/sapm196645152
27. Joseph R.I. Solitary waves in a finite depth fluid. *Journal of Physics A Mathematical and General*. 1977, 10, 12, L225. doi:10.1088/0305-4470/10/12/002
28. Kubota T., Ko D.R.S., Dobbs L. Propagation of weakly nonlinear internal waves in a stratified fluid of finite depth. *Journal of Hydronautics*. 1978, 12, 157–165. doi:10.2514/3.63127
29. Benjamin T.B. Internal waves of permanent form in fluids of great depth. *Journal of Fluid Mechanics*. 1967, 29, 559–592. doi:10.1017/S002211206700103X
30. Ono H. Algebraic solitary waves in stratified fluids. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1975, 39, 1082–1091. doi:10.1143/JPSJ.39.1082
31. Alpers W., Mitnik L.M., Hock L., Chen K.-S. ERS SAR views the tropical and subtropical ocean <http://earth.esa.int/application/ERS-SARTropical> (date of access: 29.05.2022).
32. Jackson Ch.R. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties. Second Ed. Alexandria, USA: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: <https://www.internalwaveatlas.com> (date of access: 29.05.2022).
33. Apel J.R. Oceanic Internal Waves and Solitons. In: An Atlas of Oceanic Internal Solitary Waves (May 2002). Oceanic Internal Waves and Solitons by Global Ocean Associates. *Prepared for Office of Naval Research* — Code 322 PO.
34. Gordon A., Susanto D. Banda Sea surface layer divergence. *Ocean Dynamics*. 2001, 52, 2–10. doi:10.1007/s10236-001-8172-6
35. Moore T.S. II, Marra J., Alkatiri A. Response of the Banda Sea to the southeast monsoon. *Marine Ecology Progress Series*. 2003, 261, 41–49. doi:10.3354/meps261041
36. Wawaruntu J., Fine R., Olson A.L., Gordon A.L. Recipe for Banda Sea Water. *Journal of Marine Research*. 2000, 58, 4, 547–569. doi:10.1357/002224000321511016
37. Liang L., Xue H., Shu Y. The Indonesian throughflow and the circulation in the Banda Sea: A modeling study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019, 124, 3089–3106. doi:10.1029/2018JC014926
38. Mitnik L., Dubina V. Non-linear internal waves in the Banda Sea on satellite synthetic aperture radar and visible images. *Proceedings IGARSS'09, Cape Town*, 2009, 4788–4791. doi:10.1109/IGARSS.2009.5417914
39. Novotryasov V.V. Dispersion dependences and vertical structure of internal gravity waves field in a shear current (numerical analysis). *Oceanology*. 1991, 31, 6, 885–891 (in Russian).
40. Ostrovsky L.A. Nonlinear internal waves in a rotating ocean. *Oceanology*. 1978, 18, 2, 181–191 (in Russian).
41. Apel J.R. A new analytical model for internal solitons in the ocean. *Journal of Physical Oceanography*. 2003, 33, 2247–2269. doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2247: ANAMFI>2.0.CO;2

Новотрясов В.В., Дубина В.А., Митник Л.М.
Novotryasov V.V., Dubina V.A., Mitnik L.M.

42. *Stepanyants Yu.A.* Dissipation of solitons of internal waves with cylindrical divergence. *Izv. Academy of Sciences of the USSR Physics of the atmosphere and ocean*. 1981, 17, 8, 660–661 (in Russian).
43. *Susanto R.D., Mitnik L., Zheng Q.* Ocean internal waves observed in the *Lombok Strait*. *Oceanography*. 2005, 18, 4, 80–87. doi:10.5670/oceanog.2005.08
44. *Jackson Ch.R., da Silva J.C.B., Jeans G.* The generation of nonlinear internal waves. *Oceanography*. 2012, 25, 2, 108–123. doi:10.5670/oceanog.2012.46

Об авторах

НОВОТРЯСОВ Вадим Васильевич, РИНЦ AuthorID: 7865, ORCID ID: 0000-0003-2607-9290,
e-mail: vadimnov@poi.dvo.ru

ДУБИНА Вячеслав Анатольевич, РИНЦ AuthorID: 129445, e-mail: dubina@poi.dvo.ru

МИТНИК Леонид Моисеевич, РИНЦ AuthorID: 34394, e-mail: mitnik@poi.dvo.ru

УДК 551.465.62

© А. А. Коник^{1,2*}, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, 2022

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

²Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия

³Морской гидрофизический институт РАН, 299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, Россия

*konikrshu@gmail.com

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКОВОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ В КАРСКОМ МОРЕ В ПЕРВЫЕ ДВА ДЕСЯТИЛЕТИЯ XXI ВЕКА

Статья поступила в редакцию 02.06.2022, после доработки 05.11.2022, принята в печать 11.11.2022

Аннотация

Статья посвящена получению многолетних физико-географических характеристик Стоковой фронтальной зоны как отдельной гидрологической структуры, формирующейся на границе поверхностного опресненного слоя рек Оби и Енисея и морских вод в Карском море. В качестве исходных данных для выделения фронтальной зоны в работе выступают спутниковые измерения поверхностной температуры (MODIS Aqua, Suomi NPP-VIIRS), поверхностной солености (NASA SMAP) и уровня моря (AVISO) за период с июля по октябрь с 2002 по 2020 гг. Положение и характеристики Стоковой фронтальной зоны определялись с помощью кластерного анализа, который впервые был применен к обобщенному набору данных дистанционного спутникового зондирования в этом регионе. Установлено, что в теплый период года средний многолетний температурный поверхностный градиент Стоковой фронтальной зоны составляет 0,08 °С/км, градиент поверхностной солености 0,1 PSU/км, а площадь — 155 тыс. км². Выявлено, что за безледный период второго десятилетия XXI века градиент температуры фронтальной зоны ослабевает на 0,04 °С/км, а площадь уменьшается на 100 тыс. км². Показано, что температурный и соленостный градиенты, а также площадь Стоковой фронтальной зоны определяются объемами речного стока Оби и Енисея и параметрами льдов в теплый период года. Получены оценки связи характеристик фронтальной зоны с объемами речного стока, параметрами ледяного покрова и ветра, а также величиной атмосферных индексов Скандинавского колебания.

Ключевые слова: фронтальная зона, речной плюм, морской лед, Скандинавское колебание, Карское море

© А. А. Коник^{1,2*}, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, 2022

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

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

³Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

*konikrshu@gmail.com

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE CHARACTERISTICS OF THE RIVER PLUME FRONTAL ZONE IN THE KARA SEA IN THE FIRST TWO DECADES OF THE XXI CENTURY

Received 02.06.2022, Revised 05.11.2022, Accepted 11.11.2022

Abstract

The article is devoted to obtaining long-term physical and geographical characteristics of the River Plume frontal zone as a separate hydrological structure that forms at the boundary of the fresh surface layer of the Ob and Yenisei Rivers. The primary data for identifying the frontal zone are satellite measurements of surface temperature (MODIS Aqua, Suomi NPP-VIIRS), surface salinity (NASA SMAP) and sea level (AVISO) for the period from July to October from 2002 to 2020. The position and characteristics of the River Plume frontal zone were determined using cluster analysis, which was applied for the first time to an

Ссылка для цитирования: Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 23–41. doi:10.48612/fpg/38mu-zda7-dper

For citation: Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A. Spatial and Temporal Variability of the Characteristics of the River Plume Frontal Zone in the Kara Sea in the First Two Decades of the XXI Century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 23–41. doi:10.48612/fpg/38mu-zda7-dper

integrated set of remote satellite sensing data in this region. The results of the study showed that in the warm period of the year, the average long-term surface temperature gradient of the River Plume frontal zone was $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, the surface salinity gradient was $0.1\text{ PSU}/\text{km}$, and the area was $155,000\text{ km}^2$. During the ice-free period of the second decade of the 21st century, the temperature gradient of the frontal zone weakens by $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, and the area decreases by $100,000\text{ km}^2$. The correlation analysis showed that the temperature and salinity gradients, as well as the area of the River Plume frontal zone, were determined by the volumes of the river discharge of the Ob and Yenisei and ice parameters in the warm period of the year. The article presents the obtained estimates of the relationship between the characteristics of the frontal zone and the volume of river discharge, ice cover and wind parameters, as well as the value of the atmospheric indices of the Scandinavian oscillation (SCAND).

Keywords: frontal zone, river plume, sea ice, SCAND, Kara Sea

1. Введение

Карское море является одним из окраинных морей Северного Ледовитого океана. Оно ограничивается с запада арх. Новая Земля, с юга Сибирским побережьем и с востока морем Лаптевых (рис. 1). Важным фактором формирования водных масс в Карском море является материковый сток крупных сибирских рек, общий объем которого составляет $1350\text{ км}^3/\text{год}$ [1, 2]. Наибольший вклад в формирование значительного по площади речного плюма вносят крупные реки Обь ($430\text{ км}^3/\text{год}$) и Енисей ($650\text{ км}^3/\text{год}$).

В Карском море в поверхностном слое выделяются четыре основных водных массы (типа вод). На западе моря наблюдаются баренцевоморские воды [3–5]. В северной части Карского моря располагается арктическая водная масса [6]. На юге и востоке моря наблюдаются карские воды [1–2, 7], а вблизи мест впадения крупных рек (Обь, Енисей и др.) — речные воды [1, 8–9]. Речные воды, распространяясь по акватории, образуют значительный по площади поверхностный опресненный слой (ПОС) (рис. 1) средней толщиной около 10 м, который оказывает существенное влияние на многие физические и биологические процессы в Карском море [7–11]. Область ПОС может достигать площади $200\text{--}250\text{ тыс. км}^2$ [7, 12]. В зависимости от конфигурации ПОС на поверхности моря выделяют «западный», «центральный» и «восточный» типы [1, 10] его распространения. Воды в области ПОС относительно теплые и изменяются от $4\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сентябре

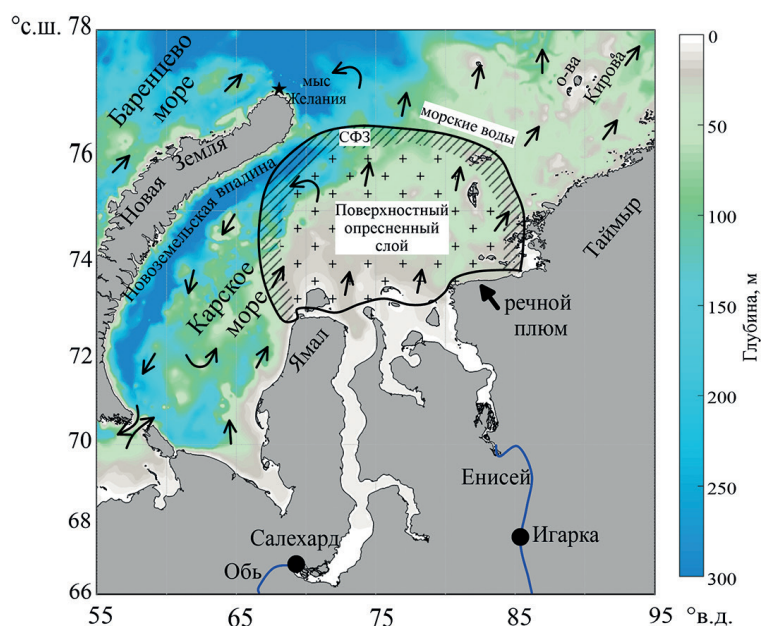


Рис. 1. Географические объекты и схема формирования Стоковой фронтальной зоны (СФЗ): черными точками показаны гидрографические посты на реках Обь (Салехард) и Енисей (Игарка), а черными стрелками — схема средних течений [1] в Карском море

Fig. 1. Geographical objects and the scheme of formation of the river plume frontal zone (RPFZ) in the Kara Sea: black dots show hydrographic posts on the Ob (Salekhard) and Yenisei (Igarka) Rivers, and black arrows show the scheme of middle currents [1] in the Kara Sea

до 10 °C в июле [1, 3, 7]. В результате перемешивания морских и речных вод в данной области фиксируются значительные колебания солёности, которые могут составлять от 8 до 17 PSU за период с июня по сентябрь [7]. Необходимо отметить, что такие пространственные колебания отражаются не только на гидрофизических характеристиках вод, но и на гидрохимических и биологических процессах моря [11, 13].

Пограничная область между водами морского и речного генезиса характеризуется значительной неустойчивостью [8–9]. Взаимодействие ПОС и морских вод приводит к формированию барьера или фронтального раздела, где значительно ослабевает вертикальное перемешивание. Согласно классификации, представленной в [14], эту границу можно назвать Стоковой фронтальной зоной (СФЗ). СФЗ — это зона между речными и морскими водами, характеризующаяся резкими солёностными и температурными градиентами. В отдельных исследованиях [11, 14, 15] получены количественные оценки положений и характеристик СФЗ в отдельные годы. В настоящее время для определения положения фронтальных зон в Карском море чаще всего используются нерегулярные судовые измерения солёности [7–9]. В большинстве таких исследований рассматривается вся область ПОС, а СФЗ, являющаяся её внешней границей, остается не исследованной. Таким образом, в настоящее время отсутствуют представления о физико-географических характеристиках СФЗ и их изменчивости, что в условиях меняющегося климата актуализирует её исследование.

Представляется, что для идентификации СФЗ на регулярной основе можно использовать постоянно поступающие данные спутниковых измерений солёности в комплексе с температурой и уровнем, как это выполнено в работе [16]. Однако в настоящее время считается, что погрешности определения характеристик поверхностной солёности в холодных и распресненных водах Карского моря по спутниковым измерениям весьма велики [17]. При этом для анализа крупномасштабной изменчивости полей солёности отдельных гидрографических станций, которые представлены в большинстве исследований [7–9], недостаточно. Поэтому использование спутниковых данных для выделения обширной фронтальной зоны требует проведения их валидации по материалам крупномасштабных океанографических измерений. Результаты подобной валидации приведены в работе [12], где показана возможность использования спутниковых измерений для определения физико-географических характеристик фронтальных зон в морях Арктики.

Согласно исследованиям [11, 18–19], на формирование ПОС влияет множество региональных факторов: объем речного стока, направление и устойчивость приводного ветра, характеристики ледовых условий на акватории. Как отмечалось в [2, 20], глобальная атмосферная циркуляция над Карским морем вносит значительный вклад в формирование и изменчивость его гидрофизических характеристик. Соответственно, пространственная динамика и характеристики СФЗ формируются под влиянием региональных и глобальных процессов взаимодействия океана и атмосферы. Однако до настоящего времени отдельное комплексное описание многолетней изменчивости параметров СФЗ в Карском море и влияющих на неё факторов проведено не было.

Отсутствие сведений о СФЗ, даже при наличии постоянно поступающих спутниковых данных, связано с проблемой выбора методического инструмента для исследования фронтальных зон в высокоширотном регионе [2, 4, 9]. Согласно концепции, представленной в работе [14], фронтальная зона является областью, где горизонтальный градиент характеристики значительно (на порядок) превышает его фоновое распределение. В морях арктического региона на поверхности, как правило, отсутствуют значительные градиенты [21, 22]. По этой причине возникают сложности с определением пространственной динамики и характеристик фронтальных зон. Анализ гидрологических полей нескольких характеристик увеличит точность определения положения фронтальной зоны. Одним из подходов, позволяющим выполнить выделение районов с большой величиной градиентов разных характеристик, является применение кластерного анализа.

Таким образом, цель данного исследования заключается в изучении пространственно-временной изменчивости характеристик СФЗ в Карском море за период с 2002 по 2020 гг. и анализе степени ее связи с процессами и явлениями разного масштаба.

2. Данные

Для определения динамики и параметров СФЗ были использованы среднемесячные спутниковые измерения температуры, солёности и уровня моря с июля по октябрь с 2002 по 2020 гг. (табл. 1).

Для идентификации термических характеристик СФЗ были использованы данные температуры поверхности моря (ТПМ) инфракрасных радиометров высокого разрешения MODIS Aqua и Suomi NPP VIIRS с пространственным шагом 0,05° [23]. Использование радиометрических данных NASA SMAP с пространственным разрешением 1/4° позволило определить характеристики солёности поверхности моря (СПМ) СФЗ [24]. Колебания уровня в СФЗ анализировались с помощью данных абсолютной динамической топографии (АДТ) набора данных AVISO с пространственным шагом 1/4° [25].

Таблица 1

Table 1

Типы и параметры данных, используемых в исследовании

Types and parameters of data

Сенсор/Набор данных	Тип данных	Время	Уровень
MODIS	ТПМ	07.2002–10.2011	L3
NPP VIIRS		07.2012–10.2020	L3
SMAP	СПМ	07.2015–10.2020	L3
Aviso	АДТ	07.2002–10.2020	L4
Arctic rivers	Речной сток	05.2002–10.2020	—
CMEMS	Ветер	07.2002–10.2020	L4
AMSR-E	Лед	07.2002–10.2011	L3
AMSR-2		07.2012–10.2020	L3

Для анализа влияния региональных процессов на динамику и параметры СФЗ использовались сведения о речном стоке, полученные в наиболее близких к Карскому морю гидропостах на Оби в Салехарде и Енисее в Игарке (рис. 1). Кроме этого, привлекались 6-часовые данные о скорости надводного ветра (восточная и северная компоненты) с пространственным разрешением $1/4^\circ$ набора данных SIW-IFREMER-BREST-FR, полученные от Copernicus Marine Environmental Monitoring Service¹. Ледовые условия (площадь и сплоченность в исследуемом районе) описывались с помощью данных радиометров AMSR-E и AMSR-2, подготовленных Бременским университетом [26].

Анализ влияния глобальных атмосферных переносов над Северной Евразией на изменение параметров СФЗ в Карском море проводился с помощью индексов атмосферной циркуляции, полученных с сайта Climate Prediction Centre². В исследовании были использованы индексы Скандинавского (СК) и Полярного (ПК) колебаний [27]. Индекс СК показывает изменение атмосферного давления над Скандинавией и при положительных значениях характеризуется усилением блокировки зональных переносов воздушных масс, а при отрицательных — их ослаблением над полуостровом [28]. Индекс ПК описывает изменчивость атмосферного давления между Арктикой и Евразией [28–29]. Положительные значения индекса характеризуют увеличение интенсивности циклонической активности в Арктике и усиление меридиональных переносов, а отрицательные — ослабление циклонов и переносов.

3. Методы

3.1. Определение вод СФЗ на поверхности Карского моря

В начале метода определения пространственного положения и количественных оценок фронтальных зон выполнялась загрузка данных ТПМ, СПМ и АДТ. Если данные по полю отсутствовали или количество пропусков, например, из-за большого количества льда на поверхности или облачного покрова, превышало 20 %, то далее они не использовались.

Основным критерием для определения фронтальной зоны является повышенный градиент характеристик гидрологических полей, величина которого в два раза выше фонового градиента Карского моря [21–22]. Поэтому далее, согласно представленному методу в [22], производился расчет горизонтальных градиентов температуры и солености.

Затем в программном обеспечении MATLAB с помощью функции «griddata» создавалась регулярная двумерная область. Координаты границ сетки соответствовали центральной части Карского моря: $69\text{--}78^\circ\text{с. ш.}$ и $55\text{--}95^\circ\text{в.д.}$ Шаг узлов сетки составил $1/4^\circ$. На построенную сетку производилась линейная интерполяция спутниковых данных ТПМ, СПМ, их градиентов и АДТ. Полученный массив данных использовался для идентификации поверхностных водных масс Карского моря методом кластерного анализа с помощью программного пакета Statistica 10.0. Главной задачей анализа являлось разбиение данных на однородные устойчивые во времени и по местоположению группы.

Перед началом расчета кластеров производилась стандартизация всех данных в объединенной матрице: выполнялось деление каждой характеристики (ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов) на её максимальное

¹CMEMS, <https://doi.org/10.48670/moi-00185> (дата обращения: 10.01.2022)

²Climate Prediction Centre, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 10.04.2022)

значение. На первом этапе для разведочного анализа использовался иерархический алгоритм кластеризации на основе метода Уорда с Евклидовой метрикой. С помощью полученных дендрограмм за разные месяцы и годы производилась предварительная оценка оптимального количества классов и подклассов, которые могут соответствовать различным типам вод. Количество классов, полученное с помощью метода Уорда, использовалось в качестве априорных ограничений для окончательного разбиения данных с помощью интерактивного метода k-means.

По результатам кластерного анализа строились ежемесячные карты распределения выделенных положений классов с акцентом на СФЗ. Полученные карты положений основных классов вод анализировались за каждый отдельный месяц. Для класса, соответствующего СФЗ, на месячном и годовом интервалах рассчитывались средние значения характеристик зоны: ТПМ, СПМ, их градиенты, АДТ и площадь.

3.2. Методы анализа влияния региональных и глобальных процессов на характеристики СФЗ

Для определения степени связи региональных и глобальных процессов с характеристиками СФЗ использовался кросскорреляционный анализ.

Сопоставление характеристик фронтальной зоны с данными о речном стоке, ветре, площади и сплошенности ледяного покрова выполнялось на месячном интервале со сдвигом до 12 месяцев. Для данных индексов атмосферной циркуляции проводился корреляционный анализ со средними сезонными оценками характеристик фронтальной зоны на временном интервале со сдвигом от 0 до 3 сезонов. Полученные коэффициенты проходили проверку с помощью критерия Стьюдента. В работе описываются только коэффициенты, значимые на 95 %-м уровне.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Результаты кластерного анализа

В качестве примера для определения и получения характеристик СФЗ использовались подготовленные данные за август 2019 г. Результаты кластеризации алгоритмом Уорда представлены на рис. 2, а. На дендрограмме четко выделялись два основных класса, что предполагает наличие существенных различий между характеристиками вод. Данные классы могут быть интерпретированы как морские и солоноватые воды. При уменьшении порогового расстояния в среднем в три раза, каждый из классов может быть разделен на два подкласса. Класс, идентифицированный как морские воды, разделялся на подклассы более четко,

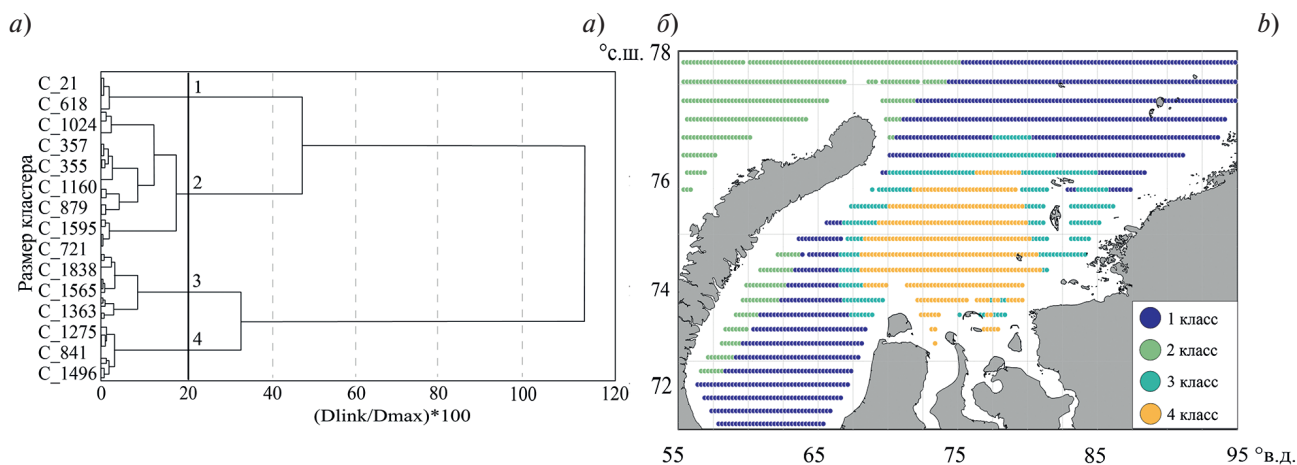


Рис. 2. Результаты кластерного анализа по спутниковым данным в августе 2019 г. в Карском море: а — дендрограмма, полученная методом Уорда. Черными вертикальными линиями и цифрами обозначены основные классы вод; б — классификация, полученная методом k-средних: 1 класс (синий) — карская водная масса, 2 класс (зеленый) — баренцевоморская водная масса, 3 класс (бирюзовый) — внешняя граница ПОС — СФЗ, 4 класс (оранжевый) — внутренняя часть ПОС

Fig. 2. The results of cluster analysis based on satellite data in August 2019 in Kara Sea: а — dendrogram obtained by Ward's method. Black vertical lines and numbers indicate the main classes of waters; б — is the classification obtained by the k-means method: class 1 (blue) — is the Kara waters, class 2 (green) — Barents waters, class 3 (turquoise) — is the outer boundary of the FSL — RPFZ, class 4 (orange) — is the inner part of the FSL

чем солоноватые. Из физических соображений известно [1, 2, 8, 11], что морские воды в данном районе разделяются на баренцевоморские и карские воды. Речные же воды, как правило, представляются единым классом [7], что вполне логично, если задать единый с морскими водами формальный уровень разделения на классы (рис. 2, а). Однако на представленной дендрограмме видно, что у класса речных вод также наблюдалось четкое разделение два подкласса, которые далее будут называться воды внутренней части ПОС и воды СФЗ. Отметим, что в исследованиях [7, 9] часто отмечалось наличие фронтальных разделов в области ПОС, характеристики вод в которых отличаются от основной массы вод опреснённой линзы. Соответственно, результаты кластерного анализа методом Уорда позволяют сделать вывод о том, что в речных водах так же, как и в морских, присутствует четкое разделение на воды с различными характеристиками. В результате, в данном регионе наиболее оптимально с физической и статистической точки зрения будет выделение четырех классов вод. Дальнейшее подробное деление на классы не целесообразно.

Полученное количество классов использовалось при кластеризации методом k-means, результаты которого изображены на рис. 2, б. Количественные оценки полученной кластеризации представлены в табл. 2. Из данной таблицы видно, что проведенная классификация позволяет достаточно четко соотнести полученные классы с водами разного генезиса, которые наблюдаются в Карском море.

Согласно [1–3, 5–6], карские воды располагаются вблизи полуострова Ямал и арх. Новая Земля на западе, а также на севере и востоке Карского моря недалеко от полуострова Таймыр. Пространственное положение 1 класса (рис. 2, б) полностью совпадает с описанием климатического положения данной водной массы, средняя температура которой составляет 6–8 °С, а соленость — 24–28 PSU [1, 2, 7]. Необходимо учитывать, что карские воды постоянно взаимодействуют с другими типами вод, что сказывается на её гидрологических характеристиках [1, 3]. В связи с этим, между полученными и климатическими термохалинными оценками могут присутствовать различия, особенно в характеристиках солености. Однако оценки поверхностных значений температуры и солености близки к индексам, соответствующим Карской водной массе.

Баренцевоморские воды попадают в Карское море с запада, севернее мыса Желания, и южным путем через Новоземельские проливы распространяются на восток [3–5]. Климатическое описание положения частично схоже с расположением второго класса (рис. 2, б). Данная водная масса характеризуется относительно высокой температурой в юго-западной части Карского моря (до 8–10 °С) и малой на северо-востоке моря (4–5 °С) [4]. Средняя соленость вод составляет 30–32 PSU, что гораздо выше в сравнении с другими водными массами данного региона [4–5]. Таким образом, средние многолетние оценки индексов баренцевоморских вод совпадают с количественными оценками 2 класса, полученными в ходе проведенной кластеризации.

Показанное в данном примере положение вод 3 и 4 класса (рис. 2, б) соотносится с «центральной» типом распространения вод ПОС, который встречается довольно часто [10]. ПОС, согласно [7], характери-

Таблица 2

Table 2

Количественные оценки характеристик ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов по результатам кластеризации в августе 2019 г.: $\bar{T}$ — ТПМ; $\nabla \bar{T}$ — градиент ТПМ; $\bar{H}$ — АДТ; $\bar{S}$ — СПМ; $\nabla \bar{S}$ — градиент СПМ; s — площадь класса

Quantitative estimates of the characteristics of SST, SSS, ADT and their gradients based on the results of clustering in August 2019: $\bar{T}$ — SST; $\nabla \bar{T}$ — SST gradient; $\bar{H}$ — ADT; $\bar{S}$ — SSS; $\nabla \bar{S}$ — SSS gradient; s — class area

Параметры	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс
$\bar{T}$, °С	5,9	4,7	7,8	8,6
$\nabla \bar{T}$, °С/км	0,05	0,04	0,06	0,04
$\bar{H}$, см	–6,9	–20,4	1,6	7,5
$\bar{S}$, PSU	28,0	32,6	19,5	12,8
$\nabla \bar{S}$, PSU/км	0,07	0,06	0,11	0,08
$s \cdot 10^3$, км ²	378	168	96	138

зуется пониженной соленостью (~15 PSU) и высокими значениями температуры (~8 °C), что также схоже с оценками 3 и 4 класса (табл. 2). Однако проведенные ранее экспедиционные исследования [7–9] и анализ спутниковых данных [10] отмечают наличие нескольких отдельных фронтальных разделов на западной, восточной и центральной границах ПОС. Это дает возможность предположить, что 3 класс, отличающийся максимальной величиной градиентов ТПМ и СПМ, относится к выделенным ранее фронтальным разделам на внешней границе ПОС. Четвертый класс, характеризующийся пониженными значениями солености и градиентов СПМ (табл. 2), является внутренней линзой вод ПОС (рис. 2, б).

Положение вод 3 класса, полученное по результатам кластеризации, схоже с исследованием [8–9], где рассматривались расположения фронтов разного генезиса, связанных с областью ПОС. Воды данного класса имеют среднюю соленость 19 PSU и занимают промежуточное положение между карскими водами (28 PSU) и внутренней линзой ПОС (12 PSU). У 3 класса наблюдаются максимальные градиенты ТПМ и СПМ, что, согласно классификации [14], подтверждает его отождествление к фронтальной зоне. Анализ полученных результатов позволяет отнести данный класс к водам СФЗ, которые формируются на границе между карскими водами (1 класс) и внутренней линзой ПОС (4 класс).

Таким образом, в рамках проведенной кластеризации и её анализа удалось выделить четыре типа вод: баренцевоморские, карские, СФЗ и внутренней линзы ПОС.

4.2. Средняя многолетняя изменчивость СФЗ

Выполнение кластерного анализа дало возможность получить многолетние количественные оценки изменчивости характеристик СФЗ за безледный период. В таблице 3 представлены осредненные многолетние параметры за теплый сезон по месяцам (июль, август, сентябрь, октябрь) за период с 2002 по 2020 гг., а также средние характеристики СФЗ за весь период исследования.

Средние многолетние оценки ТПМ за каждый месяц отражают общий годовой ход с максимумом в августе. Величина градиентов ТПМ и СПМ в течение теплого сезона выше фоновых градиентов Карского моря в среднем в два раза [1], максимум градиентов регистрируется в июле. Минимальные значения АДТ наблюдаются в июле, а максимального значения достигают в октябре. Площадь поверхностной СФЗ за теплый сезон увеличивается, максимума достигает в сентябре и затем идет на спад. Зона повышенных градиентов, ассоциируемых с СФЗ, занимает до 15 % площади Карского моря. Стоит отметить, что за октябрь не удалось получить средние многолетние оценки солености СФЗ из-за отсутствия данных в большинстве рассматриваемых лет.

Анализ пространственной изменчивости показал наличие сезонного хода в динамике СФЗ. В июле СФЗ располагается в центральной части моря и имеет довольно узкую площадь распространения. Северная граница зоны располагается у арх. Новая Земля, а южные границы у полуостровов Ямал и Таймыр. В августе площадь зоны значительно увеличивается, и её северная граница смещается ближе к Сибирскому побережью. Особенно сильно область фронтальной зоны увеличивается на востоке. Сентябрь характеризуется полным смещением зоны СФЗ на восток. Площадь зоны сильно не уменьшается, однако СФЗ вытягивается на восток до 95° в.д. В октябре площадь СФЗ значительно уменьшается, а сама зона полностью располагается вдоль восточной части Сибирского побережья. Важно отметить, что западная часть СФЗ во все месяцы исследования располагается вблизи полуострова Ямал.

Таблица 3

Table 3

Средние многолетние по месяцам и средние за весь период исследования количественные характеристики СФЗ:

$\bar{T}$ — ТПМ; $\nabla \bar{T}$ — градиент ТПМ; $\bar{H}$ — АДТ; $\bar{S}$ — СПМ; $\nabla \bar{S}$ — градиент СПМ; s — площадь СФЗ

Average long — term monthly and average for the entire period of the study quantitative characteristics of the RPFZ:

$\bar{T}$ — SST; $\nabla \bar{T}$ — SST gradient; $\bar{H}$ — ADT; $\bar{S}$ — SSS; $\nabla \bar{S}$ — SSS gradient; s — area of the RPFZ

Месяц	$\bar{T}$, °C	$\nabla \bar{T}$, °C/км	$\bar{H}$, см	$\bar{S}$, PSU	$\nabla \bar{S}$, PSU/км	$s \cdot 10^3$, км ²
Июль	5,4	0,10	–0,8	18,6	0,14	130
Август	6,3	0,06	1,2	22,6	0,10	159
Сентябрь	4,3	0,08	5,9	25,7	0,10	175
Октябрь	2,8	0,08	9,3	—	0,06	157
Среднее	4,7	0,08	3,9	22,3	0,10	155

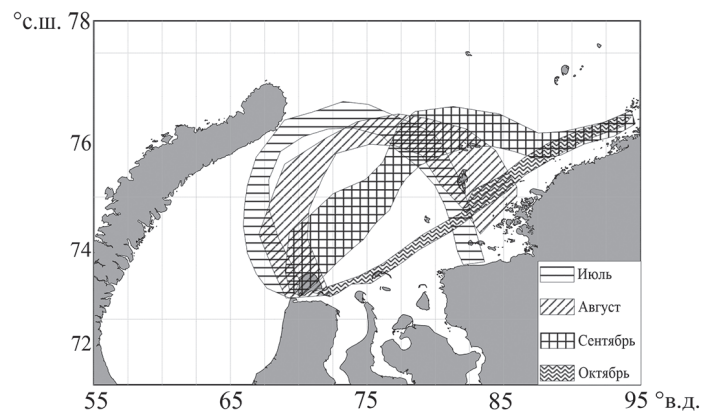


Рис. 3. Средние положения СФЗ с июля по октябрь за период 2002–2020 гг.

Fig. 3. Average RPFZ positions from July to October for the period from 2002 to 2020

4.3. Межгодовая изменчивость СФЗ

Изменчивость характеристик температуры и её градиента в СФЗ за весь рассматриваемый период представлена на рис. 4. Видно, что с 2002 по 2020 гг. ТПМ в СФЗ колеблется от 1 °C в октябре до 9,9 °C в августе. Чаще всего максимальные значения поверхностной температуры регистрируются в августе, минимальные значения ТПМ наблюдаются в октябре. В период с 2002 по 2010 гг. параметры ТПМ в каждый сезон соответствуют годовому ходу температур в Карском море: минимальные значения наблюдаются осенью, а максимальные — летом. Однако с 2011 по 2020 гг. наблюдаются выраженные положительные и отрицательные аномалии характеристик ТПМ в СФЗ. Например, в августе 2014 и 2018 гг. ТПМ составляет 3,1 °C, что почти в два раза ниже средних оценок, полученных за весь период исследования (табл. 3). При этом в последние пять лет наблюдается положительный тренд поверхностной температуры в СФЗ, на величину которого влияют максимумы в августе 2015 ($\bar{T} = 8,8$ °C) и 2020 ($\bar{T} = 9,9$ °C) г.

Величина градиента ТПМ в СФЗ за период с 2002 по 2020 гг. характеризуется значительной неоднородностью. В среднем температурный градиент в СФЗ меняется от 0,03 °C/км в августе 2020 г. до 0,17 °C/км

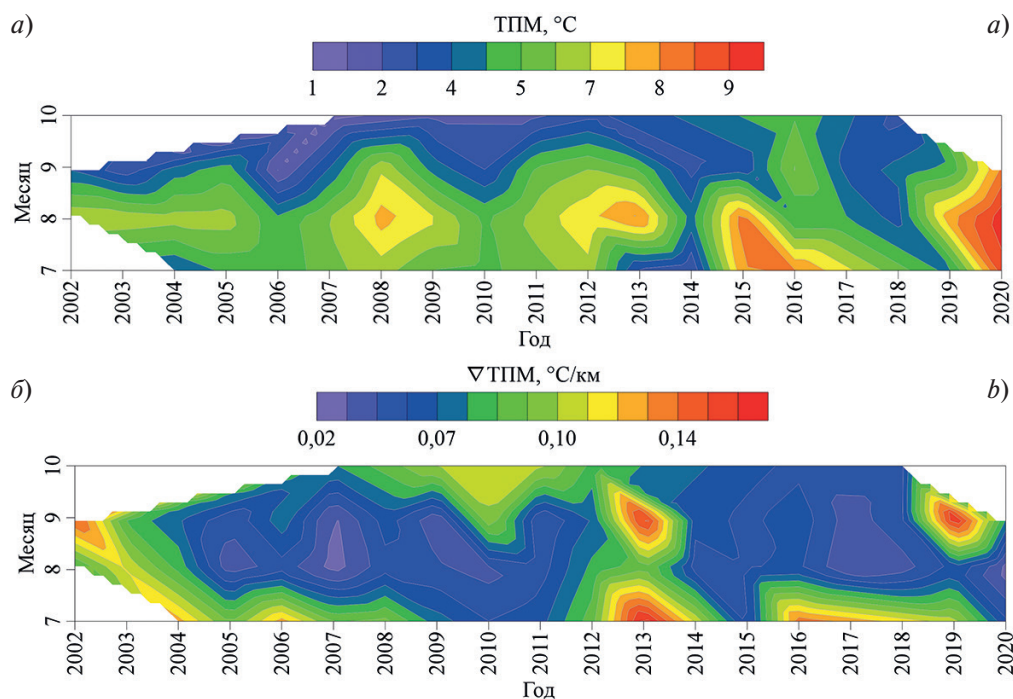


Рис. 4. Параметры ТПМ (а) и градиентов ТПМ (б) в СФЗ за период с июля по октябрь 2002–2020 гг.

Fig. 4. The SST parameters (a) and the SST gradients (b) in the RPFZ for the period from July to October 2002–2020

в июле 2013 г. Многолетняя изменчивость градиента ТПМ показала, что максимумы чаще всего отмечаются в июле и сентябре, тогда как минимумы в августе и октябре. Таким образом, значение градиента за отдельный месяц может отличаться от средней многолетней величины градиента СФЗ более чем в два раза (табл. 3). В отдельные месяцы наблюдается обратная связь между параметрами градиента ТПМ и значениями поверхностной температуры вод: в июле 2013 г. ($\bar{T} = 2,9^\circ\text{C}$; $\nabla\bar{T} = 0,17^\circ\text{C}/\text{км}$), августе 2015 г. ($\bar{T} = 8,5^\circ\text{C}$; $\nabla\bar{T} = 0,05^\circ\text{C}/\text{км}$) и сентябре 2019 г. ($\bar{T} = 4,5^\circ\text{C}$; $\nabla\bar{T} = 0,17^\circ\text{C}/\text{км}$). Важно также отметить, что во втором десятилетии XXI века градиент температуры в среднем уменьшился на $0,04^\circ\text{C}/\text{км}$.

Ввиду относительно позднего начала работы спутника NASA SMAP по сравнению с другими системами (табл. 1), данные о поверхностной солёности в СФЗ доступны только за период с 2015 по 2020 гг. (рис. 5, а). Характеристики СПМ меняются от минимума в июле ($\bar{S} = 17$ PSU) до максимума в сентябре ($\bar{S} = 29$ PSU). В июле в большинстве лет наблюдаются солоноватые воды, значение поверхностной солёности которых не превышает 17–19 PSU. В августе начинается постепенное увеличение значений СПМ, а максимальных значений величина достигает в сентябре. В целом наблюдается постепенное уменьшение СПМ в СФЗ в среднем на 3–5 PSU. Однако в полученных межгодовых оценках не наблюдаются значительные отклонения при их сопоставлении со средними значениями СПМ в СФЗ (табл. 3).

Колебания градиентов СПМ (рис. 5, б) за период исследования составляют от $0,08$ PSU/км в сентябре до $0,19$ PSU/км в июле 2016 г. Максимальная изменчивость градиентов поверхностной солёности отмечается в августе и сентябре. Относительно стабильное значение градиента наблюдается в июле и октябре. Августы 2015 и 2018 гг. выделяются на фоне общей изменчивости аномально низкими значениями градиента СПМ ($\nabla\bar{S} = 0,09$ PSU/км). Данная отрицательная аномалия отражается в характеристиках поверхностной температуры и градиентов ТПМ (рис. 5). Неоднородность параметров градиента поверхностной солёности осложняет его сопоставление со средним значением, представленным в разделе 4.2 (табл. 3).

Изменчивость характеристик АДТ в СФЗ представлена на рисунке 6, а. Минимальное значение АДТ зарегистрировано в августе 2004 г. ($\bar{H} = -7,1$ см), а максимальное — в октябре 2007 г. ($\bar{H} = 18,1$ см). Наблюдается внутрисезонный ход, который характеризуется минимумами в летние месяцы и максимумами в осенние. Полученные расчеты показывают наличие отрицательных (2004, 2008, 2015, 2017 гг.) и положительных (2013, 2016 гг.) аномалий АДТ. Однако положительная средняя величина уровня за период 2002–2020 гг. (табл. 3) сопоставима с результатами межгодовой изменчивости параметров АДТ.

Изменение площади СФЗ по результатам проведённого анализа представлено на рис. 6, б. Минимальное значение площади СФЗ отмечается в июле 2016 г. ($s = 55$ тыс. км²), а максимум в сентябре 2007 г. ($s = 340$ тыс. км²). Важно отметить, что внутрисезонный ход площади СФЗ характеризуется большой неоднородностью. Например, в 2011 г. ежемесячное значение площади практически не менялось и составляло в среднем 200–210 тыс. км². При этом, в 2009 г. за четыре месяца величина площади менялась от 50 до 160 тыс. км². Анализ многолетней изменчивости показывает, что в первом десятилетии XXI века в среднем площадь была в 4 раза больше по сравнению с периодом 2012–2020 гг. Перелом в изменчивости характеристик произошел в 2012 г., когда площадь уменьшилась с 220 до 89 тыс. км². В период с 2012 по 2020 гг. наблюдается отрицательный тренд, площадь СФЗ значительно сокращается.

Анализ внутрисезонной и межгодовой пространственной изменчивости позволил выявить несколько типов пространственного распространения СФЗ и внутренней области ПОС, которые представлены на рис. 7.

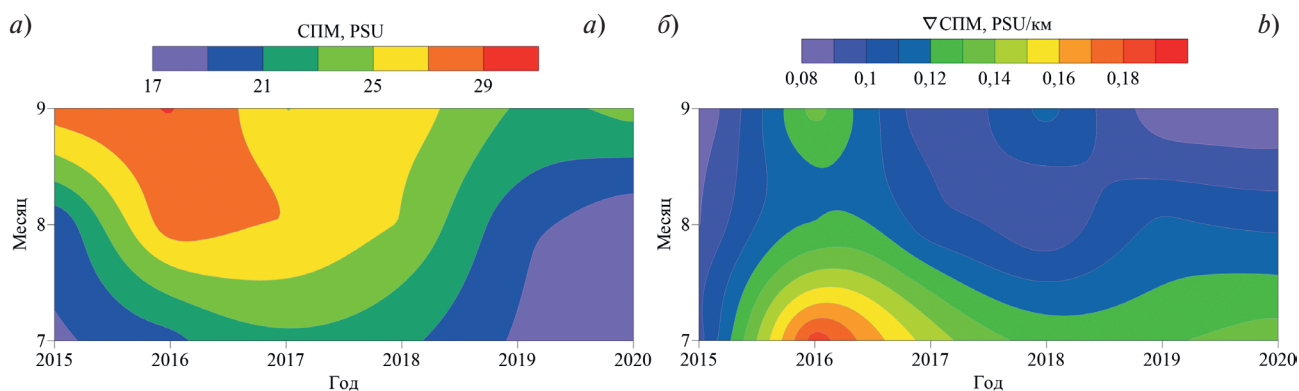


Рис. 5. Параметры СПМ (а) и градиентов СПМ (б) в СФЗ за период с июля по сентябрь 2002–2020 гг.

Fig. 5. The parameters of the SSS (a) and the SSS gradients (b) in the RPFZ for the period from July to September 2002–2020

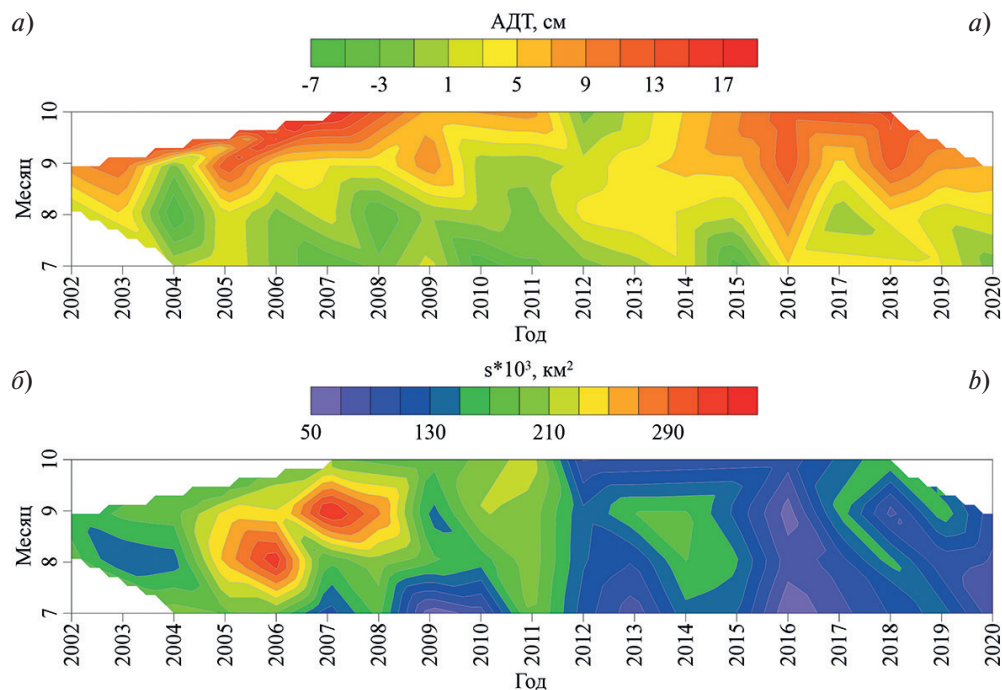


Рис. 6. Параметры АДТ (а) и площади (б) СФЗ за период с июля по октябрь 2002–2020 гг.

Fig. 6. The parameters of the ADT (a) and the area (b) of the RPFZ for the period from July to October 2002–2020

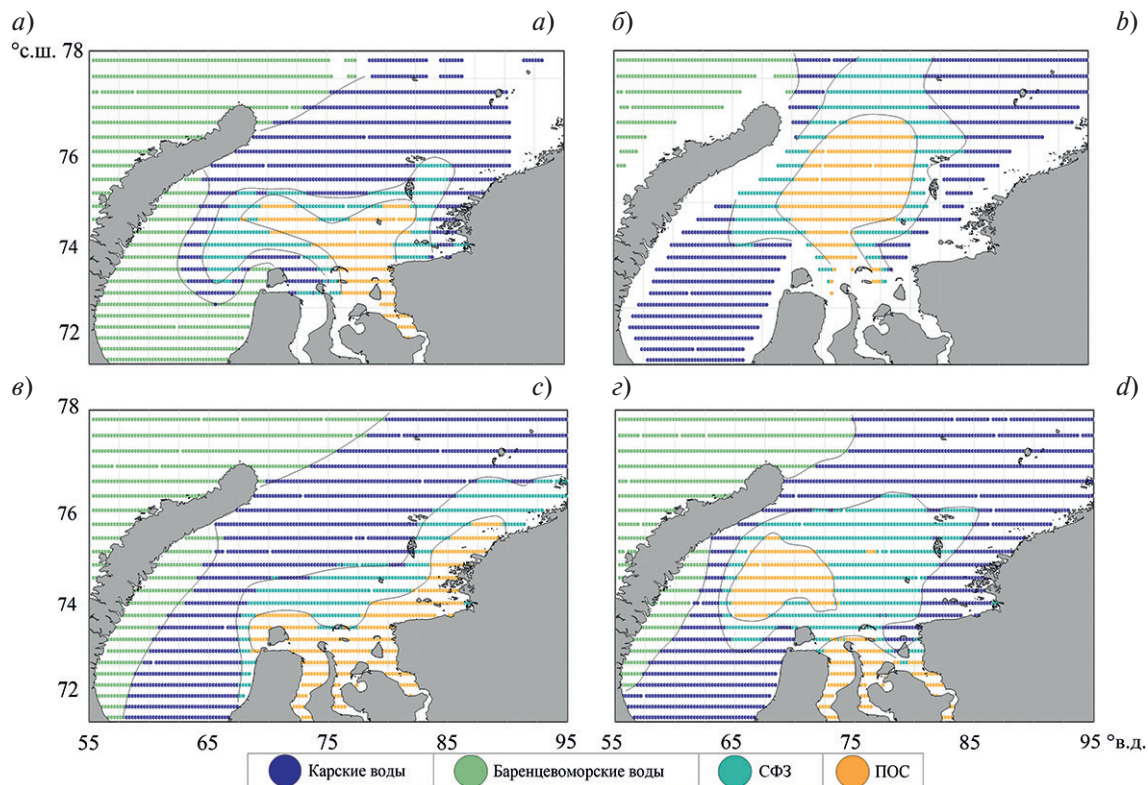


Рис. 7. Типы пространственной изменчивости основных водных масс и СФЗ (бирюзовый цвет) по результатам кластерного анализа: а — западный тип на примере июля 2007 г.; б — центральный тип на примере августа 2015 г.; в — восточный тип на примере сентября 2009 г.; г — нестандартный тип на примере августа 2011 г.

Fig. 7. Types of spatial variability of the main water masses and RPFZ (3th class) according to the results of cluster analysis: a — western type on the example of July 2007; b — central type on the example of August 2015; c — eastern type on the example of September 2009; d — atypical type on the example of August 2011

«Западный» тип (рис. 7, а) характеризуется положением СФЗ в районе 55–65° в.д. у западной части арх. Новой Земли. Видно, что внутренняя часть ПОС также в большей степени выделяется на западе, а баренцевоморские воды практически полностью занимают юго-западную часть моря. «Центральный» тип (рис. 7, б) характеризуется расположением СФЗ в районе между 65–85° в.д. Западная и восточная граница СФЗ вблизи речного стока рек Оби и Енисея тонкая, а ближе к центру увеличивается. Внутренняя область ПОС находится в СФЗ и соединена с устьевыми участками рек. При таком положении фронтальной зоны также наблюдается преобладание карских вод на поверхности моря. «Восточный» тип (рис. 7, в) распространения характеризуется расположением СФЗ вдоль Сибирского побережья: от полуострова Ямал до восточной оконечности полуострова Таймыр. При относительной большой длине распространения (от 65 до 95° в.д.) сама СФЗ довольно узкая. Внутренняя область ПОС оказывается прижатой к устьевым участкам рек и берегу. «Нестандартный» тип (рис. 7, г) СФЗ наблюдается при полном окружении фронтальной зоной внутренней области ПОС, которая делится на ряд изолированных участков. Основным признаком данного типа распределения заключается в том, что линза внутренней области ПОС отрывается от устьевых участков рек. При таком распространении СФЗ располагается на периферии внутренней области ПОС и занимает большую площадь.

4.4. Влияние речного стока и ледяного покрова на изменчивость параметров СФЗ

Сезонная изменчивость характеристик. Наиболее важной региональной особенностью Карского моря, которая влияет на формирование ПОС и СФЗ, является изменчивость речного стока крупных сибирских рек Оби и Енисея [1–2, 30]. Кроме того, на характеристики поверхностного слоя вод моря в целом оказывают влияние особенности ледовых условий [1, 31]. Средние многолетние оценки этих процессов представлены в таблице 4.

Средняя многолетняя изменчивость суммарного речного стока Оби и Енисея характеризуется выраженным максимумом в июне (100 тыс. м³/с) и минимумом в октябре (25 тыс. м³/с), что связано с началом половодья и меженью рек [30]. В мае также наблюдается максимальная площадь и сплоченность ледяного покрова, которая резко начинает уменьшаться в июне. Далее наблюдается постепенное снижение расхода рек в середине лета и практически полное освобождение центральной части Карского моря ото льдов. Минимальный уровень стока за теплый сезон наблюдается в осенний период. Минимальная площадь и сплоченность ледяного покрова наблюдается в сентябре, после отмечается их постепенный рост в октябре.

Сопоставление средних многолетних параметров СФЗ (табл. 3) и речного стока показало, что в июле за счет воздействия большого объема речных вод в СФЗ наблюдаются максимумы градиентов ТПМ и СПМ и минимумы величин СПМ и АДТ. При этом площадь СФЗ минимальна в этом месяце, что связано с процессами интенсификации перемешивания на фоне увеличенного стока рек и недостаточного радиационного прогрева. Уменьшение поверхностного температурного и соленостного градиента и увеличение ТПМ в СФЗ в августе, вероятно, связано с минимизацией неоднородных зон температуры и солености за счет значительного сокращения области влияния таяния льдов и увеличения притока солнечной радиации [1, 7]. Снижение объема теплых речных вод Оби и Енисея в августе приводит к стабилизации фронтальной зоны и росту значений СПМ, АДТ в СФЗ, а также увеличению её площади. В сентябре резкое сокращение

Таблица 4
Table 4

Средние многолетние оценки речного стока Оби и Енисея, площади ледяного покрова и его сплоченности с мая по октябрь за 2002–2020 гг.

Average long-term estimates of the river discharge of the Ob and Yenisei, the area of the ice cover and its concentration from May to October for 2002–2020

Месяц	Сток Оби, м ³ /с	Сток Енисея, м ³ /с	Площадь льда, км ² *10 ³	Сплоченность, %
Май	19465	36572	532	87
Июнь	32307	66095	332	60
Июль	21166	49959	188	23
Август	16548	37928	25	7
Сентябрь	13612	31639	13	3
Октябрь	10797	15041	204	22

объёмов речного стока и отсутствие влияния таяния льдов в данном районе определяют продолжающийся рост значений АДТ, СПМ и площади СФЗ. Величина градиента ТПМ увеличивается, а значения поверхностной температуры в СФЗ уменьшается. Вероятно, это связано с уменьшением притока солнечной радиации и началом процессов выхолаживания [1] в Карском море. При этом, величина градиента СПМ в СФЗ не изменяется по сравнению с прошлыми месяцами. В октябре отмечается максимальная величина АДТ в СФЗ, что связано с началом осенней межени рек Оби и Енисея [30]. В результате интенсивного выхолаживания всей толщи вод Карского моря, сформированного отрицательными температурами воздуха [3], параметры ТПМ и площади СФЗ значительно уменьшаются. При этом из-за роста площади и сплоченности льдов [1, 3] возникает все больше неоднородностей в полях термохалинных характеристик, что приводит к относительно большой величине температурного градиента СФЗ.

Межгодовая изменчивость характеристик. Оценки характеристик речного стока, площади и сплоченности ледяного покрова по годам представлены на рис. 8. При этом, наблюдаются положительные (2002 г. — 61 тыс. м³/с; 2007 г. — 58 тыс. м³/с; 2014 г. — 56 тыс. м³/с; 2015 г. — 57 тыс. м³/с) и отрицательные аномалии (2012 г. — 35 тыс. м³/с) суммарного стока. Площадь и сплоченность ледяного покрова имеют общий отрицательный тренд, который особенно выражен в отдельные годы (2011 г. — 136 тыс. км², 23 %; 2012 г. — 133 тыс. км², 26 %; 2016 г. — 153 тыс. км², 20 %; 2020 г. — 120 тыс. км², 19 %). Важно отметить, что в некоторые годы (2011–2014 гг.; 2014–2016 гг.) величина суммарного стока рек и площадь со сплоченностью ледяного покрова изменяются квазисинхронно.

Сопоставление межгодовых параметров стока и льда с характеристиками СФЗ показало, что общий рост поверхностной температуры СФЗ (рис. 4, а) за период с 2002 по 2020 гг. формируется на фоне отрицательных величин площади, сплоченности ледяного покрова и стока рек. Стоит отметить, что относительно низкая ТПМ в СФЗ (4,7 °С) в 2010 г. совпадает с малыми значениями площади и сплоченности ледяного покрова. Резкое увеличение объема речного стока рек Оби и Енисея, площади и сплоченности ледяного покрова совпадает по времени с минимальными значениями ТПМ в СФЗ в 2011 г. и 2018 г. Рост значений ТПМ в СФЗ в 2016 г., 2019–2020 гг. соотносится с уменьшением сплоченности и площади ледяного покрова. Таким образом, значительные колебания поверхностной температуры СФЗ во второе десятилетие XXI века на фоне уменьшения площади и сплоченности льдов отражают глобальные климатические изменения, происходящие в Арктике [32].

Большая величина градиента ТПМ в СФЗ, зафиксированная в 2002 и в 2013 гг., совпадает с годом увеличенного объема речного стока на фоне повышенных значений сплоченности ледяного покрова. Рост температурного градиента в эти годы, вероятно, возникает в результате увеличения температурных контрастов между большим объемом теплых речных и охлажденных льдом морских вод. Малые значения градиента ТПМ в СФЗ возникают на фоне небольшой величины площади и сплоченности льдов, которая уменьшает температурный контраст между морскими и речными водами.

Изменение поверхностной солёности в СФЗ в общих чертах соотносится с изменением речного стока Оби и Енисея: малая величина солёности отмечается в конце весеннего половодья, а увеличение — в начале осенней межени [30]. Эти же процессы отражаются и на величине градиента СПМ в СФЗ.



Рис. 8. Межгодовые оценки (2002–2020 гг.) речного стока Оби и Енисея, площади ледяного покрова и его сплоченности в районе исследования

Fig. 8. Interannual estimates (2002–2020) of river discharge Ob and Yenisei, sea ice cover area and its state in the study area

Многолетние колебания уровня (рис. 6, *a*) в период с 2002 по 2010 гг. в целом стабильны, что связано с малой амплитудой изменчивости речного стока в данный период. Значительное уменьшение объема речных вод Оби и Енисея в 2011 г. находит отражение в наблюдающейся положительной аномалии АДТ.

Максимальные значения площади СФЗ в первую декаду XXI века (2006 г., 2007 г.) соотносятся с большими объемами речного стока Оби и Енисея, которые увеличивают зону распространения речных вод в Карском море. В период с 2011 по 2020 гг. величина площади значительно уменьшается, однако амплитуда её изменчивости возрастает. Малая величина площади СФЗ в 2012 и 2016 г. отмечается при минимальных значениях речного стока и характеристик льда. Вероятно, возникающая на фоне относительно стабильных значений ТПМ и СПМ гомогенизация вод приводит к минимизации неоднородных зон, и, как следствие, площади СФЗ.

Корреляционный анализ показал, что объем речного стока Енисея имеет значимый коэффициент корреляции за июль ($r = 0,61$) и август ($r = 0,51$) со значениями площади СФЗ в сентябре. Вероятно, большие объемы речного стока в первые месяцы лета формируют значительную площадь ПОС, которая затем интенсивно перемешивается с морскими водами в сентябре, что отражается на росте площади СФЗ в последующие месяцы. Площадь и сплоченность льдов за октябрь предыдущего года коррелирует с июльскими значениями температуры ($r = -0,72$) и августовскими значениями градиента ТПМ ($r = 0,58$) в СФЗ. Возможная причина такой связи кроется в том, что площадь образовавшихся в октябре льдов является индикатором объема теплозапаса вод моря [31], сформированного за теплый сезон. В результате величина теплозапаса влияет на уменьшение температуры моря в период образования фронтальной зоны, что по мере прогрева поверхностного слоя отражается на интенсификации температурного градиента СФЗ.

4.5. Влияние ветра на изменчивость характеристик СФЗ

Одним из ключевых факторов, влияющих на поверхностную динамику вод Карского моря является ветровое воздействие [1, 3]. Для анализа связи ветровой динамики и положения фронтальной зоны были построены композитные карты, представленные на рис. 9.

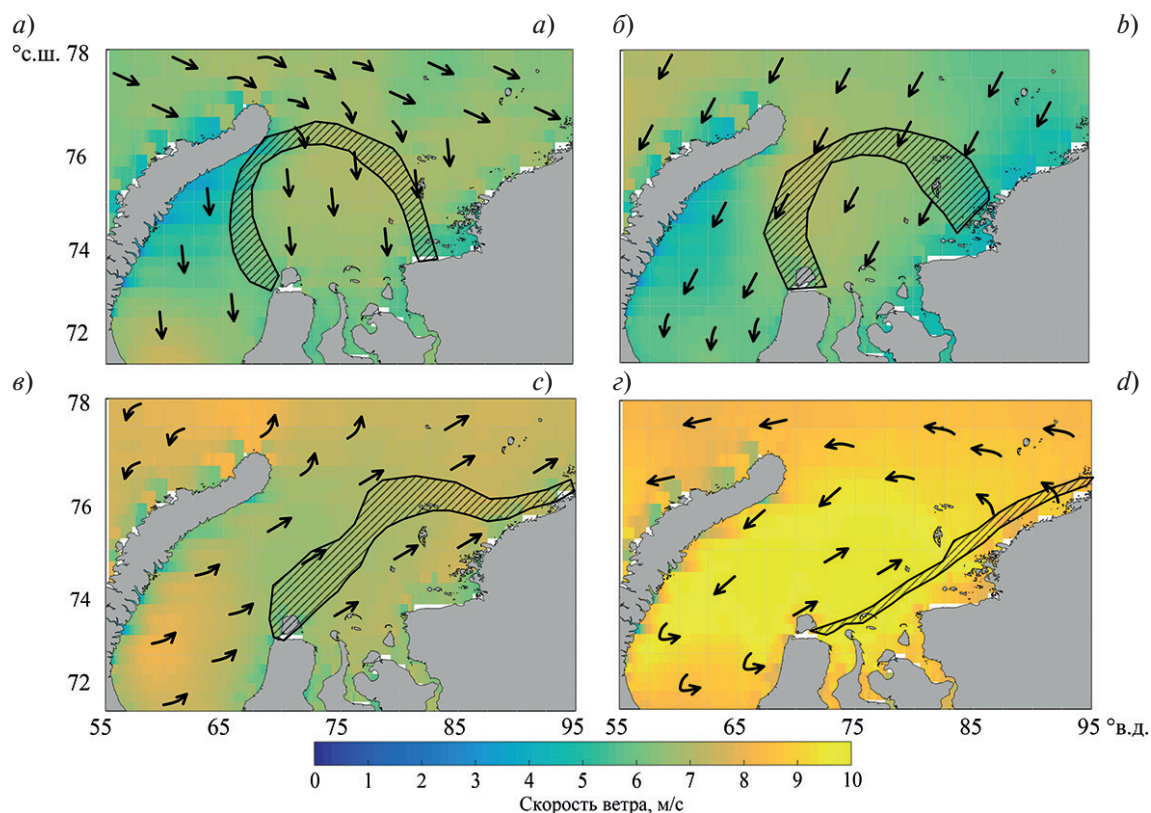


Рис. 9. Композитная карта скорости и направления ветра над акваторией Карского моря и положений СФЗ по средним многолетним данным 2002–2020 гг.: *a* — июль, *b* — август, *c* — сентябрь, *d* — октябрь

Fig. 9. Composite map of wind speed and direction over the Kara Sea and RPFZ positions according to the average multiyear data of 2002–2020: *a* — July, *b* — August, *c* — September, *d* — October

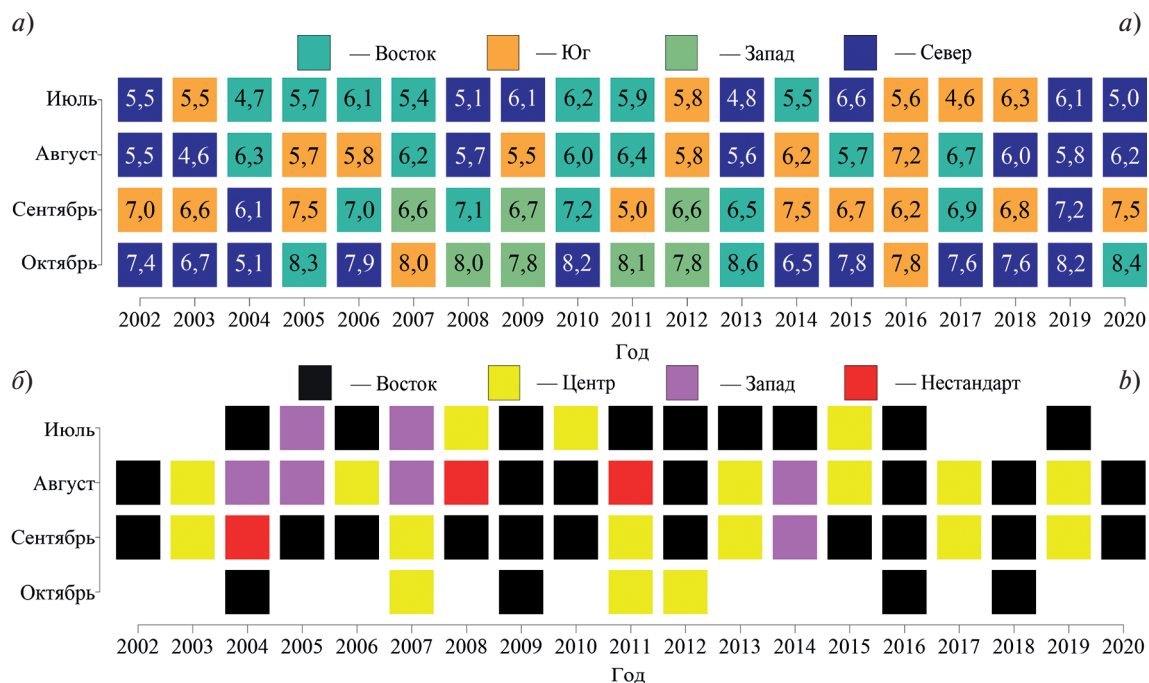


Рис. 10. Скорость и направление ветра (а), и типы распространения СФЗ (б) за период с июля по октябрь 2002–2020 гг.

Fig. 10. Wind speed and direction (a), and types of RPFZ propagation (b) for the period from July to October from 2002 to 2020

В июле под влиянием северного ветра в приповерхностных слоях моря возникают течения юго-восточного направления. В результате СФЗ вытягивается от полуострова Ямал до северной оконечности арх. Новая Земля. Схожая картина наблюдается в августе, однако СФЗ слегка отодвигается на юг и смещается в центр Карского моря. В сентябре скорость ветра увеличивается, что усиливает влияние поверхностных ветровых течений и влечет за собой смену положения СФЗ, которое характеризуется смещением зоны к Сибирскому побережью. Усиление юго-западных ветров на фоне отрицательных температур воздуха [15] и значительного уменьшения речного стока в октябре (табл. 4) приводит к еще большему сдвигу положения СФЗ на юг к Сибирскому побережью.

Сопоставление характеристик ветра (рис. 10, а) с характеристиками площади СФЗ (рис. 4, б) показало, что в периоды её максимумов (2006–2007 гг.) наблюдается западный ветер средней силой до 6 м/с, а минимумы (2012, 2016 гг.) возникают под воздействием ветров южных и восточных румбов со средней скоростью более 6 м/с.

Из рис. 10, б видно, что наиболее часто встречающийся «восточный» тип распространения СФЗ наблюдается при южных и юго-западных ветрах со скоростью более 6 м/с. Данный ветер интенсифицирует движение линзы пресных вод вдоль Сибирского побережья, которая формируется под влиянием силы Кориолиса. Для «центрального» типа СФЗ характерны ветры северных румбов со скоростью более 6,5 м/с, сила которых ослабляет основное геострофическое течение вдоль берега. Это приводит к смещению ПОС на запад от Сибирского побережья в центральную часть Карского моря. Редкий «западный» тип распространения СФЗ формируется восточными ветрами со скоростью более 6 м/с. Вероятно, усиление экмановского переноса смещает поверхностный циклонический круговорот в центральной части Карского моря [1], что приводит к отклонению линзы пресных вод на запад. Условия для появления «нестандартного» типа распространения СФЗ характеризуются преобладанием ветров северных румбов со скоростью чуть более 6 м/с. Малая величина силы ветра ослабляет экмановский перенос, что приводит к формированию обширных фронтальных зон, разделению вод внутренней линзы ПОС на части и формированию «нестандартного» типа распространения СФЗ.

4.6. Влияние атмосферной циркуляции над Северной Евразией на характеристики СФЗ

Карское море преимущественно находится под влиянием полярного климата [3]. В результате, влияние процессов переноса воздушных масс, связанных с глобальной атмосферной циркуляцией, на климат данного моря довольно велико [1]. Для анализа были привлечены осредненные индексы СК (отражает зональный перенос) и ПК (отражает меридиональный перенос). Временной ход индексов представлен на рис. 11.

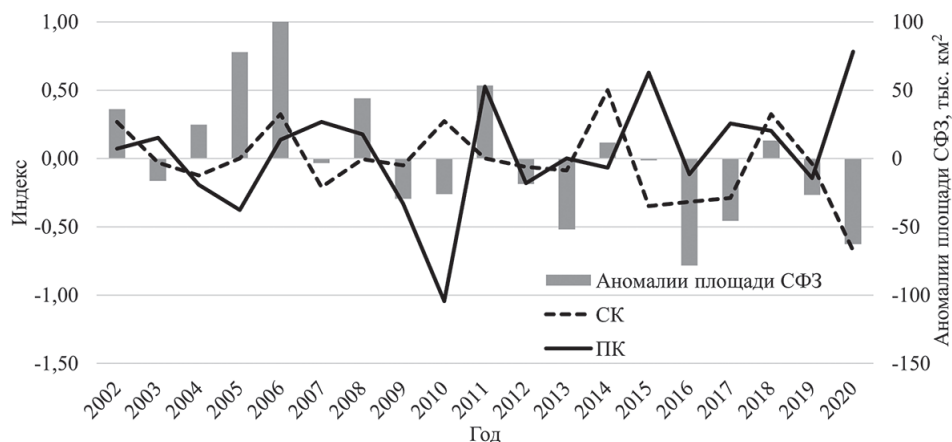


Рис. 11. Межгодовая динамика осредненных летних индексов атмосферной циркуляции Скандинавского колебания (штрих-линия) и зимних индексов Полярного колебания (сплошная линия), а также аномалий площади СФЗ за летний период (отклонение от среднего значения за весь период исследования, серые столбцы)

Fig. 11. Interannual dynamics of the averaged summer atmospheric circulation indices of the SCAND (dashed line), winter indices of the POL (solid line), and RPFZ anomalies (deviation from the average value for the entire study period, gray columns) of the area over the summer period

Изменчивость колебания СК в целом характеризуется отрицательными значениями. Минимальное значение ($-0,67$) колебания СК отмечается в 2020 г., а максимальное ($0,18$) в 2010. Средняя межгодовая амплитуда составляет $0,9-1,0$. С 2019 г. наблюдается отрицательная фаза, что отражается на ослаблении зонального переноса теплого атлантического воздуха и процессов блокировки циклонов, проходящих с запада на восток. Изменчивость индекса ПК (черная линия) характеризуется в основном положительными значениями. Минимум индекса ($-1,04$) отмечается в 2010 г., а максимум ($0,78$) в 2020 г. Размах межгодовых колебаний составляет $1,8-2$. В период с 2019 по 2020 гг. данный индекс характеризуется положительной фазой, что отражает усиление меридионального переноса холодного арктического воздуха из Арктики и увеличение количества проходящих циклонов с севера на юг.

Взаимный анализ межгодовой изменчивости параметров СФЗ и индексов глобальной атмосферной циркуляции показал, что большая величина градиентов ТПМ в СФЗ в 2010, 2016 и 2019 гг. отмечается в период отрицательной фазы индексов ПК. Вероятно, на фоне ослабления меридионального переноса холодного воздуха с Арктики в Евразию [29] происходит усиление выхолаживания морских вод, при этом речные воды остаются теплыми, что далее сказывается на интенсивности градиента ТПМ в СФЗ. Минимальные значения градиентов ТПМ в СФЗ в 2010, 2018 и 2020 гг. регистрируются при росте индексов СК. Скорее всего, это связано с интенсификацией зональной атмосферной циркуляции [29], которая увеличивает поступление тёплого воздуха из Атлантики и минимизирует неоднородности градиента ТПМ. Максимальные значения площади СФЗ в 2006 г. соотносятся с ростом обоих индексов атмосферной циркуляции. Минимальные значения площади СФЗ в 2012 и 2016 гг. регистрируются в отрицательной фазе с индексами СК и ПК. Возможно, уменьшение интенсивности глобального переноса на фоне значительного таяния ледяного покрова отразилось на интенсивности прогрева вод, что повлияло на величину площади СФЗ.

Корреляционный анализ атмосферной циркуляции с параметрами СФЗ показал наличие связи между летним индексом СК ($r = 0,65$) и летней площадью СФЗ. Возможной причиной такой связи является усиление зонального переноса [28], который повлиял на региональную ветровую циркуляцию, определяющую распространение поверхностных вод СФЗ.

5. Заключение

Одним из наиболее важных результатов данной работы являются полученные многолетние оценки пространственно-временной изменчивости и параметров СФЗ в Карском море как отдельной гидрологической структуры вод.

Впервые для данного региона при определении физико-географических характеристик СФЗ была применена универсальная методика, в основу которой легло использование кластерного анализа на базе комплексных данных спутникового дистанционного зондирования. Метод достаточно прост в использовании и пригоден для выделения фронтальных зон в различных морях арктического региона.

В работе рассчитаны и представлены средние многолетние и межгодовые количественные характеристики поверхностных проявлений СФЗ. Многолетний градиент ТПМ в фронтальной зоне за весь период исследования составил $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, СПМ — $0,1\text{ PSU}/\text{км}$, а площадь — 155 тыс. км^2 . Описаны средние многолетние положения СФЗ в теплый период года. Изменчивость межгодовых оценок градиента ТПМ в СФЗ составила от $0,03$ до $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, градиента СПМ от $0,06$ до $0,19\text{ PSU}/\text{км}$, а площади от 50 до 340 тыс. км^2 . Наблюдается наличие значительных аномалий разного знака практически по всем параметрам СФЗ во второй декаде XXI века. Особенно сильно это отражается в поверхностных градиентах температуры, которые в среднем в два раза выше фоновых величин. Градиент температуры поверхностной СФЗ за вторую декаду XXI века ослаб на $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а её площадь за тот же период в среднем уменьшилась на 100 тыс. км^2 . Полученные результаты указывают на значительную изменчивость СФЗ за последние 20 лет на фоне отмечаемых глобальных изменений в климате Арктики [32].

Анализ корреляционных оценок показал наличие статистически значимых связей региональных и глобальных процессов с параметрами вод СФЗ. Установлено, что наибольший вклад в изменчивость количественных характеристик СФЗ вносит речной сток Енисея и характеристики ледяного покрова (площадь и сплоченность). Большая величина индекса СК отражается на увеличении площади в СФЗ, что может быть связано с блокированием зонального переноса и увеличением осадков в зоне водосбора рек Оби и Енисея в различные периоды года.

Таким образом, полученные результаты многолетнего анализа СФЗ в Карском море за первые два десятилетия XXI века показали, что глобальные климатические изменения отражаются на характеристиках фронтальной зоны. Выявленные особенности многолетней изменчивости параметров могут быть типичными и для других СФЗ Арктики (Лены, Колымы, Макензи). Следующие работы будут направлены на исследование синоптической изменчивости СФЗ и создании модели прогноза её параметров.

Финансирование

Обработка данных о характеристиках фронтальной зоны выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-35-90053 аспиранты. Сопоставление и анализ связи параметров фронтальных зон и региональных и глобальных процессов выполнены в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0014.

Funding

Data processing of the frontal zone characteristics was carried out within the framework of the RFBR grant No. 20–35–90053 postgraduate students. Comparison and analysis of the connection between the parameters of the frontal zones and regional and global processes was carried out as part of the State assignment Theme No. FMWE-2021–0014.

Литература

1. Pavlov V.K., Pfirman S.L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 1995. Vol. 42, N 6. P. 1369–1390. doi:10.1016/0967–0645(95)00046–1
2. Harms I.H., Karcher M.J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Vol. 140, N C6. P. 13431–13448. doi:10.1029/1999jc900048
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 192 с.
4. Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // Ocean Science. 2016. Vol. 12, N 1. P. 169–184. doi:10.5194/os-12–169–2016
5. Barton B.I., Lique C., & Lenn Y.-D. Water mass properties derived from satellite observations in the Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125. e2019JC015449. doi:10.1029/2019JC015449
6. Bauch D., Cherniavskaia E. Water Mass Classification on a Highly Variable Arctic Shelf Region: Origin of Laptev Sea Water Masses and Implications for the Nutrient Budget // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. Vol. 123, N 3. P. 1896–1906. doi:10.1002/2017jc013524

7. Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavialov P.O. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. P. 1–35. doi:10.1029/2020jc016486
8. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 698–708.
9. Завьялов П.О., Ижницкий А.С., Осадчиев А.А., Пелевин В.В., Грабовский А.Б. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря осенью 2011 года // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 4. С. 514. doi:10.7868/S0030157415040176
10. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based Lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 176. P. 177–187. doi:10.1016/j.rse.2016.01.020
11. Polukhin A.A. The role of river runoff in the Kara Sea surface layer acidification and carbonate system changes // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. P. 105007. doi:10.1088/1748-9326/ab421
12. Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Педченко А.П. Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 2. С. 241–250. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250
13. Holmes R.M., Peterson B.J., Zulidov V.V. et al. Nutrient chemistry of the Ob' and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 expedition and evaluation of longterm data sets // *Marine Chemistry*. 2001. Vol. 75. P. 219–227. doi:10.1016/s0304-4203(01)00038-x
14. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
15. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Свергун Е.И., Коник А.А. Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 237–246. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-237-246
16. Zhuk V.R., Kubryakov A.A. Interannual variability of the Lena River plume propagation in 1993–2020 during the ice-free period on the base of satellite salinity, temperature, and altimetry measurements // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, N 21. 4252. P. 1–20. doi: 10.3390/rs13214252
17. Supply A., Boutin J., Vergely J.-L., Kolodziejczyk N., Reverdin G., Reul N., Tarasenko A. New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 249. P. 112027. doi:10.1016/j.rse.2020.112027
18. Janout M.A., et al. Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120. P. 4925–4944. doi:10.1002/2014JC010635
19. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
20. Warner J.L., Screen J.A., Scaife A.A. Links between Barents-Kara Sea ice and the extratropical atmospheric circulation explained by internal variability and tropical forcing // *Geophysical Research Letters*. 2019. P. 1–18. doi:10.1029/2019gl085679
21. Kostianoy A.G., Nihoul J.C.J., Rodionov V.B. Physical oceanography of the frontal zones in Sub-Arctic Seas. Elsevier Oceanography Series, 2004. 71 p.
22. Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // *ICES Journal of Marine Science*. 2019. Vol. 76. P. i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
23. Liu Y., Minnett P.J. Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 177. P. 48–64. doi:10.1016/j.rse.2016.02.026
24. Meissner T., Wentz F.J., Le Vine D.M. The Salinity Retrieval Algorithms for the NASA Aquarius Version 5 and SMAP Version 3 Releases // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. P. 1121. doi:10.3390/rs10071121
25. Ablain M. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. P. 67–82. doi:10.5194/os-11-67-2015
26. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E89-GHz channels // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. P. C02S03. doi:10.1029/2005JC003384
27. Climate Diagnostics Bulletin. Climate Prediction Center. US Department of Commerce, 1999. 80 p.
28. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Monthly Weather Review*. 1987. Vol. 115, N 6. P. 1083–1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;
29. Gao N., Bueh C., Xie Z., Gong Y.A. Novel Identification of the Polar/Eurasia Pattern and Its Weather Impact in May // *Journal of Meteorological Research*. 2019. Vol. 33, N 5. P. 810–825. doi:10.1007/s13351-019-9023-z

30. Кузин В.И., Лантева Н.А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 525–529.
31. Карклин В.П., Юлин А.В., Шарапунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4. С. 37–46. doi:10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46
32. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016) // Polar Science. 2020. P. 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548

References

1. Pavlov V.K., Pfirman S.L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 1995, 42, 6, 1369–1390. doi:10.1016/0967-0645(95)00046-1
2. Harms I.H., Karcher M.J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999, 104, C6, 13431–13448. doi:10.1029/1999jc900048
3. Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. Seas of the USSR. Moscow, MGU, 1982. 192 p. (in Russian).
4. Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011). *Ocean Science*. 2016, 12, 1, 169–184. doi:10.5194/os-12-169-2016
5. Barton B.I., Lique C., Lenn Y.-D. Water mass properties derived from satellite observations in the Barents Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 125, e2019JC015449. doi:10.1029/2019JC015449
6. Bauch D., Cherniavskaia E. Water Mass Classification on a Highly Variable Arctic Shelf Region: Origin of Laptev Sea Water Masses and Implications for the Nutrient Budget. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018, 123, 3, 1896–1906. doi:10.1002/2017jc013524
7. Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavialov P.O. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 1–35. doi:10.1029/2020jc016486
8. Zatsepin A.G., Zavialov P.O., Kremenetskiy V.V., Poyarkov S.G., Soloviev D.M. Fresh surface layer in the Kara Sea. *Oceanology*. 2010, 50, 5, 643–656. doi:10.1134/S0001437010050024
9. Zavialov P.O., Izhitskiy A.S., Osadchiev A.A., Pelevin V.V., Grabovskiy A.B. The structure of thermohaline and bio-optical fields in the surface layer of the Kara Sea in September 2011. *Oceanology*. 2015, 55, 4, 461–471. doi:10.1134/s0001437015040177
10. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based Lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 176, 177–187. doi:10.1016/j.rse.2016.01.020
11. Polukhin A.A. The role of river runoff in the Kara Sea surface layer acidification and carbonate system changes. *Environmental Research Letters*. 2019, 14, 105007. doi:10.1088/1748-9326/ab421
12. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Pedchenko A.P. Assessment of the variability of the river plums frontal zone in the Kara Sea on the basis of integration of satellite remote sensing data. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021, 18, 2, 241–250 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250
13. Holmes R.M., Peterson B.J., Zulidov V.V. et al. Nutrient chemistry of the Ob' and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 expedition and evaluation of longterm data sets. *Marine Chemistry*. 2001, 75, 219–227. doi:10.1016/s0304-4203(01)00038-x
14. Fedorov K.N. The physical nature and structure of oceanic fronts. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983. 296 p. (in Russian).
15. Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Svergun E.I., Konik A.A. Submesoscale eddy structures and frontal dynamics in the Barents Sea. *Physical Oceanography*. 2018, 25, 3, 220–228. doi:10.22449/1573-160X-2018-3-220-228
16. Zhuk V.R., Kubryakov A.A. Interannual variability of the Lena River plume propagation in 1993–2020 during the ice-free period on the base of satellite salinity, temperature, and altimetry measurements. *Remote Sensing*. 2021, 13, 21, 4252, 1–20. doi:10.3390/rs13214252
17. Supply A., Boutin J., Vergely J.-L., Kolodziejczyk N., Reverdin G., Reul N., Tarasenko A. New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean. *Remote Sensing of Environment*. 2020, 249, 112027. doi:10.1016/j.rse.2020.112027
18. Janout M.A. et al. Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015, 120, 4925–4944. doi:10.1002/2014JC010635
19. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data. *Oceanologia*. 2020, 62, 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
20. Warner J.L., Screen J.A., Scaife A.A. Links between Barents-Kara Sea ice and the extratropical atmospheric circulation explained by internal variability and tropical forcing. *Geophysical Research Letters*. 2019, 1–18. doi:10.1029/2019gl085679

21. Kostianoy A.G., Nihoul J.C.J., Rodionov V.B. Physical oceanography of the frontal zones in Sub-Arctic Seas. *Elsevier Oceanography Series*, 2004. 71 p.
22. Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting. *ICES Journal of Marine Science*. 2019, 76, i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
23. Liu Y., Minnett P.J. Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 177, 48–64. doi:10.1016/j.rse.2016.02.026
24. Meissner T., Wentz F.J., and Le Vine D.M. The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius Version 5 and SMAP Version 3 releases. *Remote Sensing*. 2018, 10, 1121. doi:10.3390/rs10071121
25. Ablain M. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Science*. 2015, 11, 67–82. doi:10.5194/os-11-67-2015
26. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E89-GHz channels. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113, C02S03. doi:10.1029/2005JC003384
27. Climate Diagnostics Bulletin. Climate Prediction Center. *US Department of Commerce*, 1999. 80 p.
28. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*. 1987, 115, 6, 1083–1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;
29. Gao N., Bueh C., Xie Z., Gong Y.A. Novel identification of the Polar/Eurasia pattern and its weather impact in May. *Journal of Meteorological Research*. 2019, 33, 5, 810–825. doi:10.1007/s13351-019-9023-z
30. Kuzin V.I., Lapteva N.A. Mathematical simulation of runoff of main Siberian rivers. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014, 27, 6, 525–529 (in Russian).
31. Karklin V.O., Yulin A.V., Sharatunova M.V., Mochnova L.P. Climate variability of the Kara Sea ice massifs. *Arctic and Antarctic Research*. 2017, 4, 37–46 (in Russian). doi:10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46
32. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic climate change research project (2011–2016). *Polar Science*. 2020, 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548

Об авторах

КОНИК Александр Александрович, РИНЦ AuthorID: 950834, ORCID: 0000-0002-2089-158X,
Scopus AuthorID: 57203864647, e-mail: konikrshu@gmail.com

ЗИМИН Алексей Вадимович, РИНЦ AuthorID: 124451, ORCID: 0000-0003-1662-6385,
Scopus AuthorID: 55032301400, WoS ResearcherID: C-5885-2014, e-mail: zimin2@mail.ru

АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, РИНЦ AuthorID: 846708, ORCID: 0000-0001-6820-0533,
e-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

УДК 581.526.325.4; 577.355.3

© И. В. Ковалёва^{1*}, З. З. Финенко¹, В. В. Суслин², 2022

¹Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», пр. Нахимова, д. 2, г. Севастополь, 299011, Россия

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

*ila.82@mail.ru

ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЛУБОКОВОДНОЙ ОБЛАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В 1998–2015 ГОДЫ

Статья поступила в редакцию 16.10.2021, после доработки 30.06.2022, принята в печать 16.09.2022

Аннотация

Проведен анализ многолетних сезонных изменений концентрации хлорофилла, максимальной скорости фотосинтеза фитопланктона и температуры воды в поверхностном слое глубоководной зоны Черного моря с 1998 по 2015 годы. Оценивались тренды указанных показателей. Для исследований использовались данные спутниковых наблюдений SeaWiFS и MODIS-Aqua, MODIS-Terra. Выявлены тенденции к повышению температуры на 4% по среднегодовым данным в глубоководной западной части моря за 18-тилетний период. Повышение происходило преимущественно за счет зимнего сезона. Понижение первичной продукции фитопланктона отмечено в пределах 16,4–18,6% от первоначального уровня по среднегодовым величинам при уровне значимости $p < 0,1$, по всей глубоководной области. Снижение первичной продукции наблюдалось летом. Статистически значимых направленных изменений концентрации хлорофилла по осредненным данным за 18 лет не отмечено. В различных частях глубоководной зоны направленность межгодовых и сезонных изменений всех показателей была сходной. Намечившаяся тенденция к снижению продуктивности фитопланктона за последние годы может привести к перестройке фитопланктонного сообщества.

Ключевые слова: многолетние тренды, сезонная изменчивость, температура воды, концентрация хлорофилла a , продуктивность фитопланктона, глобальное потепление, Черное море, спутниковые измерения

© I. V. Kovalyova^{1*}, Z. Z. Finenko¹, V. V. Suslin², 2022

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 299011, Nakhimov Pr, 2, Sevastopol, Russia

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

*ila.82@mail.ru

TRENDS IN CHANGES IN PRIMARY PHYTOPLANKTON PRODUCTION ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA IN THE DEEP-SEA REGION OF THE BLACK SEA FOR 1998–2015

Received 16.10.2021, Revised 30.06.2022, Accepted 16.09.2022

Abstract

The analysis of long-term seasonal changes in the concentration of chlorophyll, the maximum rate of phytoplankton photosynthesis and water temperature in the surface layer of the open waters Black Sea from 1998 to 2015 has been carried out. The trends of these indicators were assessed. For the research, we used the data of satellite observations SeaWiFS and MODIS-Aqua, MODIS-Terra. Typical positive temperature trends of 4% in the deep-water western part of the sea. An annual temperature rise in deep-water areas was noted in the western cyclonic circulation by 0.038 °C. According to average annual data in other areas, no increase was found. The increase was mainly due to the winter season. Negative trends of primary phytoplankton production within 16.4–18.6% of the initial level according to average annual values throughout the deep-water area. Significance level — $p < 0.1$. A decrease in primary production was observed in the summer. There were no statistically significant directional changes in

Ссылка для цитирования: Ковалёва И.В., Финенко З.З., Суслин В.В. Тренды изменения первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования в глубоководной области Черного моря в 1998–2015 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 42–53. doi:10.48612/fpg/dfbm-t6da-5rvb

For citation: Kovalyova I.V., Finenko Z.Z., Suslin V.V. Trends in Changes in Primary Phytoplankton Production According to Remote Sensing Data in the Deep-Sea Region of the Black Sea for 1998–2015. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 42–53. doi:10.48612/fpg/dfbm-t6da-5rvb

chlorophyll concentration based on averaged data over 18 years. In different parts of the deep-sea area, the direction of interannual and seasonal changes in all indicators was similar. The emerging trend towards a decrease in phytoplankton productivity in recent years may lead to a restructuring of the phytoplankton community.

Keywords: long-term trends, seasonal variability, water temperature, chlorophyll *a* concentration, phytoplankton productivity, global warming, Black Sea, satellite measurements

1. Введение

На фоне глобального потепления актуальны на сегодняшний день исследования долговременных изменений различных экологических показателей морских систем. Анализ временной динамики фитопланктона и температуры воды необходимы для оценки и прогнозирования экологического состояния морской среды. На сегодняшний день стали доступны регулярные спутниковые измерения оптических характеристик моря за длительные периоды на больших акваториях, позволяющие оценить концентрацию хлорофилла *a* и температуру воды, а также рассчитывать продуктивность и другие характеристики фитопланктона, благодаря которым можно наблюдать и объяснять процессы, протекающие в море. Показатели, на которых основана оценка первичной продукции — биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла, интенсивность освещения и температура воды — подвержены сезонным и межгодовым колебаниям. Температура влияет на скорость ассимиляции углерода, и ее повышение ведет к повышению первичной продукции. Кроме того, в естественной среде температура воды, как один из важных факторов, определяет стратификацию в водоеме и способствует образованию конвекционных потоков водных масс, приводящих к поступлению биогенных веществ в эвфотический слой. Эти процессы могут либо повышать продуктивность фитопланктона, либо понижать. Факторов, влияющих на первичную продукцию, много, и в рамках одного исследования их рассмотреть и проанализировать проблематично из-за обширности таких исследований. Поэтому в данной работе мы выбрали три показателя для того, чтобы провести совместную оценку их изменчивости в море. Прежде всего, это концентрация хлорофилла, как основная физиологическая характеристика фитопланктона. Отдельно изменчивость концентрации хлорофилла исследовалась многими авторами в различных частях моря [1–5], но параллельная оценка ее изменчивости с вариациями продуктивности фитопланктона проводилась значительно реже, в особенности на широких масштабах глубоководной области Черного моря. Также представляет интерес физический фактор — температура воды в поверхностном слое, существенность влияния глобального потепления на глубоководную часть Черного моря и первичную продукцию. Кроме долгопериодных тенденций в изменчивости температуры воды свыше 30-ти лет, возможны ее изменения и за более короткие временные интервалы [6], более выраженные, или имеющие противоположный характер по отношению к предыдущему периоду и в целом долгопериодной тенденции. Это может приводить к изменениям в экосистеме, как в исследуемый период, так и более долгосрочным. Поэтому целесообразно рассматривать характер изменчивости на коротких отрезках времени в несколько лет или за одно-два десятилетия, а также в отдельные сезоны.

Сезонная и многолетняя динамика первичной продукции отражает трофность и устойчивость экосистемы в целом. Многочисленные исследования посвящены сезонным и долговременным изменениям температуры воды и концентрации хлорофилла для отдельных акваторий [1–4], биомассы фитопланктона и ее сезонным изменениям [5, 7], а также исследованиям таксономического состава фитопланктонного сообщества [1, 5, 8]. Однако исследований многолетней сезонной динамики концентрации хлорофилла, температуры воды и первичной продукции одновременно с определением трендов указанных характеристик по всей акватории глубоководной части Черного моря за последние десятилетия по непрерывным данным не проводилось. В данном исследовании важно то, что рассматриваемые характеристики взяты из одной базы данных, и необходимые параметры рассчитываются по единому алгоритму, позволяющему проводить параллельное сравнение их изменений. А также возможность выявлять особенности связи среднегодовых показателей фитопланктона и в отдельные сезоны. В этом новизна проводимой работы.

Цель работы — оценить сезонные и многолетние тренды концентрации хлорофилла, температуры воды и продукции фитопланктона в глубоководных районах Черного моря за 18-летний период 1998–2015 гг.

2. Материалы и методы

Для расчетов и анализа межгодовых трендов были выделены районы в Черном море согласно гидрологическим особенностям: 1 — глубоководная часть, включающая западный циклональный круговорот; 2 — глубоководная часть, включающая восточный циклональный круговорот; 3 — район, включающий Батумский антициклон (рис. 1).

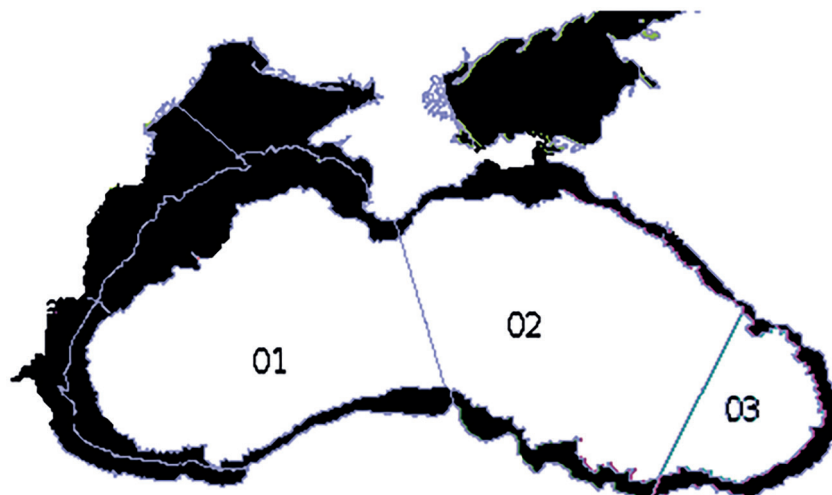


Рис. 1. Карта глубоководных районов в Черном море

Fig. 1. Map of deep-sea regions in the Black Sea

Осреднение по районам проводилось для центральной части моря на акваториях с глубиной больше 500 м в поверхностном слое. Ориентировочные границы крупномасштабных циркуляций принимались, как предложено в работе [9]. В исследованиях использовались спутниковые данные SeaWiFS\R2018.0\MLAC\ Level-2, MODIS-Aqua\R2018.0\LAC\Level-2 и MODIS-Terra\R2018.0\LAC\ Level-2¹. Пространственное разрешение данных составляет ~ 1 км в надири. Level-2 продукт обозначает данные второго уровня, которые включают время измерения, географическую привязку и ряд стандартных продуктов в физических единицах: спектр коэффициента яркости моря, R_{RS} в sr^{-1} ; концентрацию хлорофилла a , X_{L0} , в $mg\ m^{-3}$, рассчитанную на основе алгоритма, разработанного в Морском гидрофизическом институте (для SeaWiFS и MODIS) [10]. По результатам сравнения трех алгоритмов — стандартного NASA, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института РАН (МГИ) — восстановления концентрации хлорофилла a по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра на основе доступных измерений *in situ* за период с 1997 по 2015 гг, продукт МГИ дает наименьшую относительную ошибку (~40 %) [11]. Модель МГИ [10] позволяет лучше учитывать цветение диатомовых водорослей в весенний период. Используемые коэффициенты яркости моря на трех длинах волн 490, 510 и 555 нм для SeaWiFS и 488, 531 и 547 нм для MODIS учитывают изменение поглощения окрашенного растворенного вещества и слабо чувствительны к ошибкам атмосферной коррекции и обратному рассеянию света взвесью [10]. Таким образом, концентрация хлорофилла a , полученная с помощью этого регионального алгоритма, учитывает оптические свойства воды в верхнем слое моря в пределах первой оптической глубины.

Температура в поверхностном слое получена из спутниковых наблюдений для 1998–1999 гг. <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>, для 2000–2015 гг — MODIS-Aqua/Terra, интенсивность ФАР в диапазоне 400–700 нм — <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/par/>. Измерения спутниковым сканером SeaWiFS проводились с 1998 по 2010 гг, с 2000 по 2015 гг. — приборами MODIS-Aqua и MODIS-Terra. Использовались спутниковые наблюдения, осредненные за двухнедельный период по ежесуточным данным за 18 лет до 2015 года, с наиболее точной, последней коррекцией на момент исследования. Для расчета продукции фитопланктона использовалась модель, описанная в работе [12].

Для фитопланктона, обитающего в поверхностном слое моря, P — чистая суточная продукция фитопланктона, $mg\ C\ m^{-3}\ сут^{-1}$ определялась как:

$$P = X_{L0} \cdot P_m \cdot th \left(\frac{\alpha^B \cdot E_0}{P_m} \right), \quad (1)$$

где X_{L0} — концентрация хлорофилла в поверхностном слое, $mg\ m^{-3}$; P_m — максимальная скорость фотосинтеза, нормированная на единицу хлорофилла, $mg\ C\ mg\ X_{L0}^{-1}\ сут^{-1}$; α^B — тангенс угла наклона кривой фотосинтез — свет, нормированный на концентрацию хлорофилла, $mg\ C\ mg\ X_{L0}^{-1}\ моль\ квантов^{-1}\ м^{-2}$; E_0 — фотосинтетически активная радиация (ФАР), $моль\ квантов\ м^{-2}\ сут^{-1}$.

¹ <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>

$P_m = \alpha^B \cdot E_k$, где E_k — начало светового насыщения фотосинтеза, (моль квантов $\text{м}^{-2} \text{сут}^{-1}$). По экспериментальным данным, полученным в поверхностном слое Черного моря для температуры 6,5–23 °C [13], E_k равно:

$$E_k = c \cdot \exp(b \cdot T) \cdot s \cdot DL, \quad (2)$$

где T — температура, °C; DL — продолжительность дня, ч; c и b — коэффициенты, полученные экспериментально; $c = 17,4$, $b = 0,066$. Для данного уравнения — $r^2 = 0,7$.

Тангенс угла наклона кривой фотосинтез — свет, нормированный на концентрацию хлорофилла, определяется:

$$\alpha^B = w \cdot (\text{Хл}_0^v) / s, \quad (3)$$

где коэффициенты w и v получены экспериментально: $w = 0,11$, $v = 0,29$. Коэффициент детерминации — $r^2 = 0,95$.

Статистическая обработка данных проводилась в пакетах программ Sigma Plot 12.5, Grapher, Excel. В качестве показателя статистической значимости тренда оценивался критерий Фишера при заданном уровне значимости. Так как осреднение проводилось на больших пространственных и временных масштабах и исследуемые параметры варьировали в широком диапазоне в различные сезоны, для выявления характерных тенденций нами принимался уровень значимости $\alpha = 0,1$.

3. Результаты

3.1. Многолетние тренды температуры воды в глубоководной части Черного моря

Влияние температуры на продукцию фитопланктона может быть как прямое, так и косвенное. Температура влияет на усиление или ослабление конвекционных потоков, которые контролируют продукцию и биомассу фитопланктона. Тенденции незначительного повышения температуры воды за 18 лет по всей акватории глубоководной части моря по регулярным двухнедельным данным были недостоверны. По осредненным данным для отдельных районов тренд повышения температуры отмечен при уровне значимости для района 1 — $p < 0,05$, для района 2 и 3 — недостоверен (рис. 2). Таким образом, по среднегодовым значениям наблюдался слабый положительный тренд — 4 % — за весь рассматриваемый период только в акватории, включающей западный циклонический круговорот (рис. 2). Наибольшие изменения температуры имели место зимой и весной. Возрастание температуры в 1 и 3 регионах зимой было статистически значимым за 18-тилетний период ($p < 0,05$), а во втором — при $p < 0,1$. Весной повышение наблюдалось при уровне значимости $p < 0,1$ в 1-м и 2-м районах, в Батумском антициклоническом круговороте тренд был недостоверен (рис. 3). Осенью и летом статистически значимые тренды отсутствовали. Полученные тренды нестабильны и проявляются лишь в отдельные сезоны, поэтому говорить о характерной тенденции потепления воды в поверхностном слое моря нельзя. Только в районе западного циклонического круговорота наблюдалось наиболее заметное повышение температуры ежегодно приблизительно — на 0,038 °C. При этом более высокая средняя температура отмечена в восточной части моря.

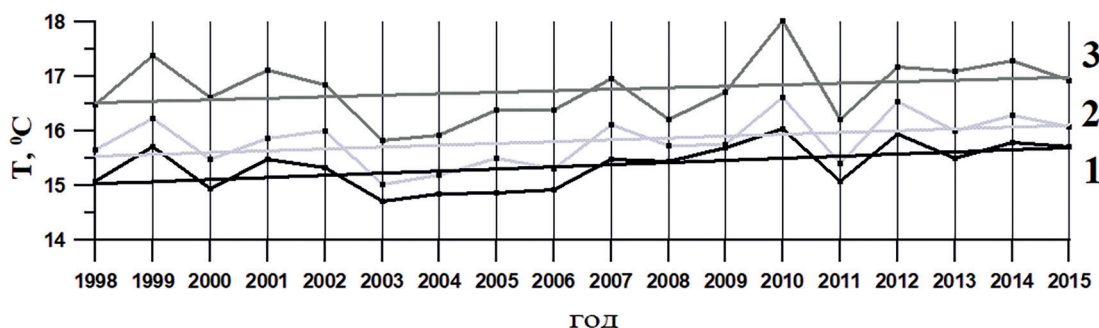


Рис. 2. Тренды среднегодовых значений температуры воды в поверхностном слое в глубоководных районах Черного моря

Fig. 2. Trends of mean annual values of water temperature in the surface layer in the deep-water regions of the Black Sea

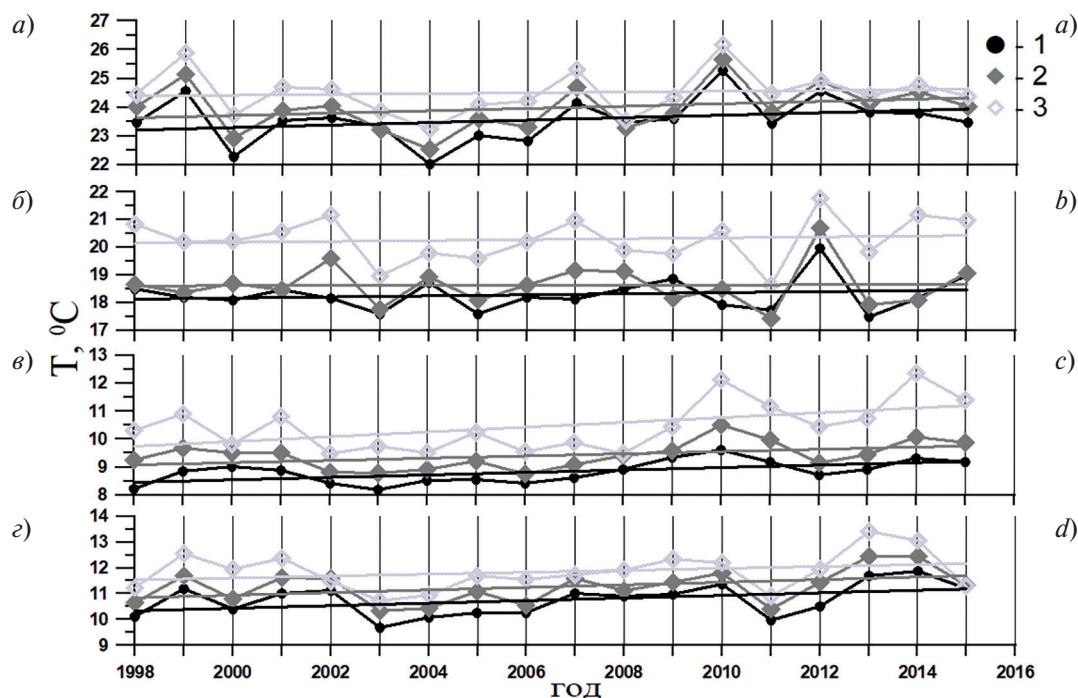


Рис. 3. Тренды сезонных изменений температуры воды в поверхностном слое в глубоководной области Черного моря в районах: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◇; а — летом, б — осенью, в — зимой, г — весной

Fig. 3. Trends of seasonal changes in water temperature in the surface layer in the deep-water area of the Black Sea in the areas: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◇; а — in summer, б — in autumn, в — in winter, г — in spring

3.2. Многолетние тренды концентрации хлорофилла в глубоководной части Черного моря

В глубоководных районах (рис. 1) характер среднегодовых изменений концентрации хлорофилла был идентичен. За 18-летний период можно отметить тенденцию к снижению концентрации хлорофилла (рис. 4), однако статистически значимых трендов по среднегодовым данным обнаружено не было. Годы с высокой концентрацией хлорофилла — 1998, 2000, 2003, 2004 — оказали существенное влияние на повышение этого показателя в первой половине исследуемого периода. Повышения происходили также в 2009, 2011 гг. Заметное снижение хлорофилла произошло после 2012 г. с минимальными значениями в 2013 г. Как видно (рис. 4), периоды увеличения среднегодовых значений концентрации хлорофилла сменяются периодами снижения. Среднегодовые величины за 18 лет для трех районов составили $0,63 \pm 0,07$ мг м⁻³, $0,62 \pm 0,05$ мг м⁻³, $0,61 \pm 0,06$ мг м⁻³ соответственно.

Сезонные изменения во всех районах происходили сходным образом (рис. 5). По двухнедельным регулярным многолетним наблюдениям концентрация хлорофилла достоверно снижалась в летний сезон. Статистически значимые тренды по оценкам критерия Фишера были получены для трех районов при уровне значимости $p < 0,001$. Весной в указанных районах отмечен слабый отрицательный тренд при уровне значимости $p < 0,03$, осенью и зимой тренд не наблюдался по всей глубоководной части моря.

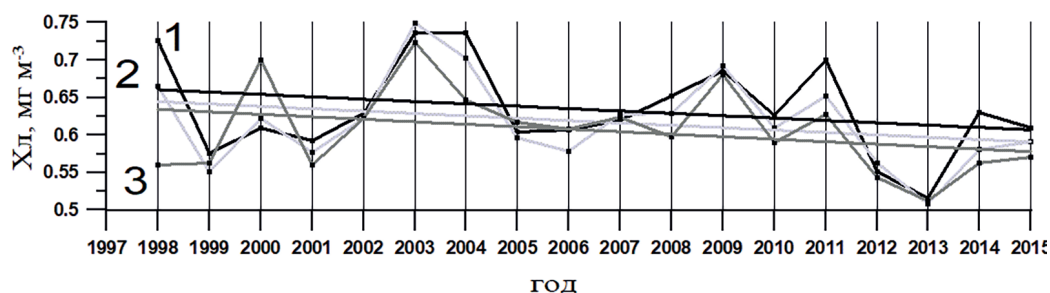


Рис. 4. Тренды среднегодовых значений концентрации хлорофилла в глубоководных районах Черного моря

Fig. 4. Trends in the average annual values of chlorophyll concentration in the deep-water regions of the Black Sea

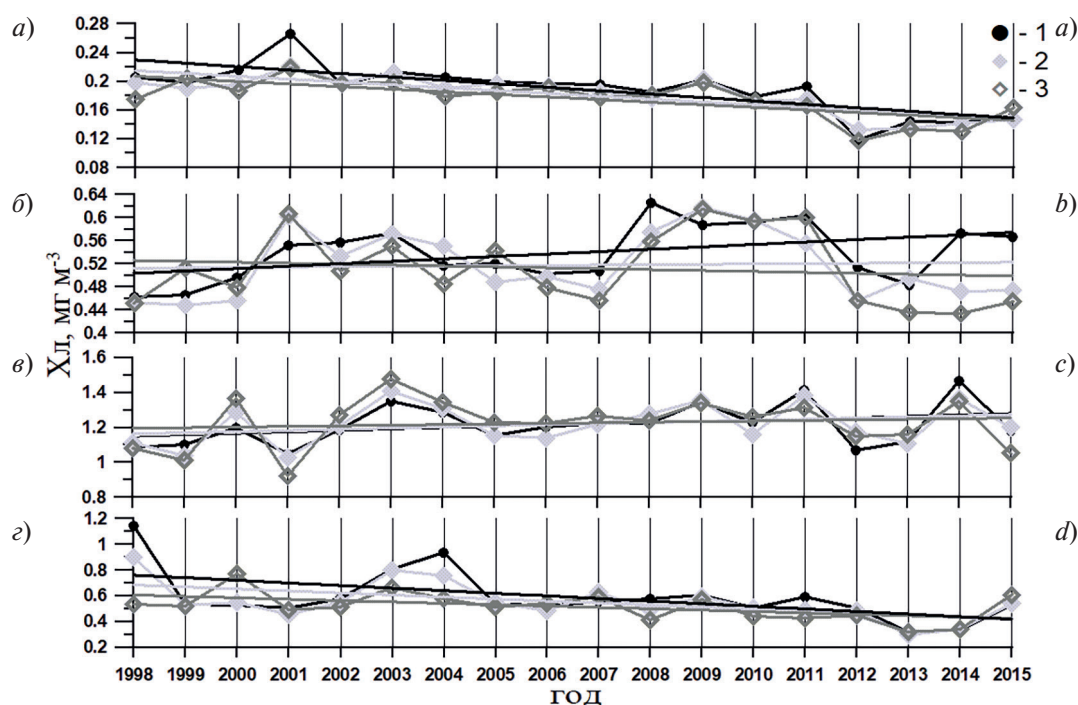


Рис. 5. Тренды сезонных изменений концентрации хлорофилла в глубоководной области Черного моря, в районах: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◇; а — летом; б — осенью; в — зимой; г — весной

Fig. 5. Trends of seasonal changes in chlorophyll concentration in the deep-water area of the Black Sea, in areas: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◇; а — in summer; б — in autumn; в — in winter; г — in spring

Таблица
Table

Среднесезонные значения концентрации хлорофилла для трех районов за 18 лет, $\langle X_{\text{л}} \rangle$, мг м^{-3}
Average seasonal values of chlorophyll concentration for three districts over 18 years, $\langle \text{Chl} \rangle$, mg m^{-3}

Сезон	Район 1	Район 2	Район 3
Лето	$0,18 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,04$
Осень	$0,53 \pm 0,29$	$0,52 \pm 0,28$	$0,51 \pm 0,28$
Зима	$1,22 \pm 0,26$	$1,22 \pm 0,27$	$1,22 \pm 0,30$
Весна	$0,59 \pm 0,44$	$0,55 \pm 0,39$	$0,52 \pm 0,35$

Однако во второй половине исследуемого периода осенью и зимой по не осредненным двухнедельным данным, а также среднесезонным за 18 лет отмечено повышение вариабельности величин. Высокая вариабельность величин наблюдалась и в конце 1990-х — начале 2000-х гг, как по осредненным, так и по неосредненным данным в течение большинства сезонов.

3.3. Многолетние тренды первичной продукции фитопланктона в глубоководной части Черного моря

Характер изменения среднегодовых значений первичной продукции в трех глубоководных районах был одинаковым и сходным с изменением концентрации хлорофилла (рис. 6). Средняя многолетняя продукция варьировала в узких пределах — $24,6\text{--}5,4 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$ в поверхностном слое (0–1 м) моря. В течение года наиболее высокие значения наблюдались в зимний период (в среднем $34\text{--}38 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$), минимальные — летом ($16\text{--}17 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$). Весной и осенью среднесезонные значения находились приблизительно на одном уровне ($23\text{--}25 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$) в трех районах. Однако вариабельность величин в весенний период в различные годы была выше (от 11 до $56 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$), чем осенью, что, вероятно, связано с периодом установления стратификации в столбе воды. По всей глубоководной зоне в зимний период с 1998 по 2015 гг. наблюдался слабый положительный тренд первичной продукции (для 1 и 3 районов при уровне значимости

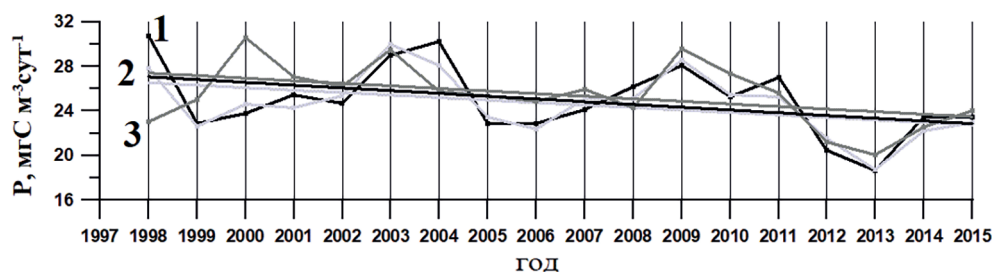


Рис. 6. Тренды среднегодовых значений продукции фитопланктона в глубоководных районах Черного моря

Fig. 6. Trends in the average annual values of phytoplankton production in the deep-water regions of the Black Sea

$p < 0,05$, для района 2 при $p < 0,1$). Осенью слабый положительный наклон отмечен в районах 2 и 3 при $p < 0,1$, тогда как в районе 1 он отсутствовал. Отрицательный тренд летом отмечен при уровне значимости $p < 0,001$ для районов 1, 2, и для района 3 — $p < 0,005$, а весной для 2 и 3 зон статистически значимое снижение продуктивности наблюдалось при $p < 0,01$, для зоны 1 — $p < 0,02$ (рис. 7).

Понижение первичной продукции летом и весной привело к общему снижению по среднегодовым данным за 18-тилетний период. По всей глубоководной зоне наблюдался отрицательный тренд в пределах 16,4–18,6% (рис. 6) по оценкам критерия Фишера при уровне значимости $p < 0,1$. Отдельные повышения среднегодовых значений происходили в 1998, 2000, 2003, 2004, 2009 гг. аналогично изменениям концентрации хлорофилла. Продукция фитопланктона является производной величиной концентрации хлорофилла, что приводит к схожести динамики двух показателей. Однако наклон трендов продукции был более выражен, в отличие от концентрации хлорофилла. Стоит отметить, что по не осредненным регулярным двухнедельным измерениям первичной продукции также наблюдался отрицательный наклон для 1-го и 2-го районов при уровне значимости $p < 0,05$ и $0,06$ соответственно. В третьем он отсутствовал. Осреднение данных, с одной стороны, снижает точность, с другой стороны, уменьшает вариабельность исследуемых показателей и позволяет выявить общие тенденции.

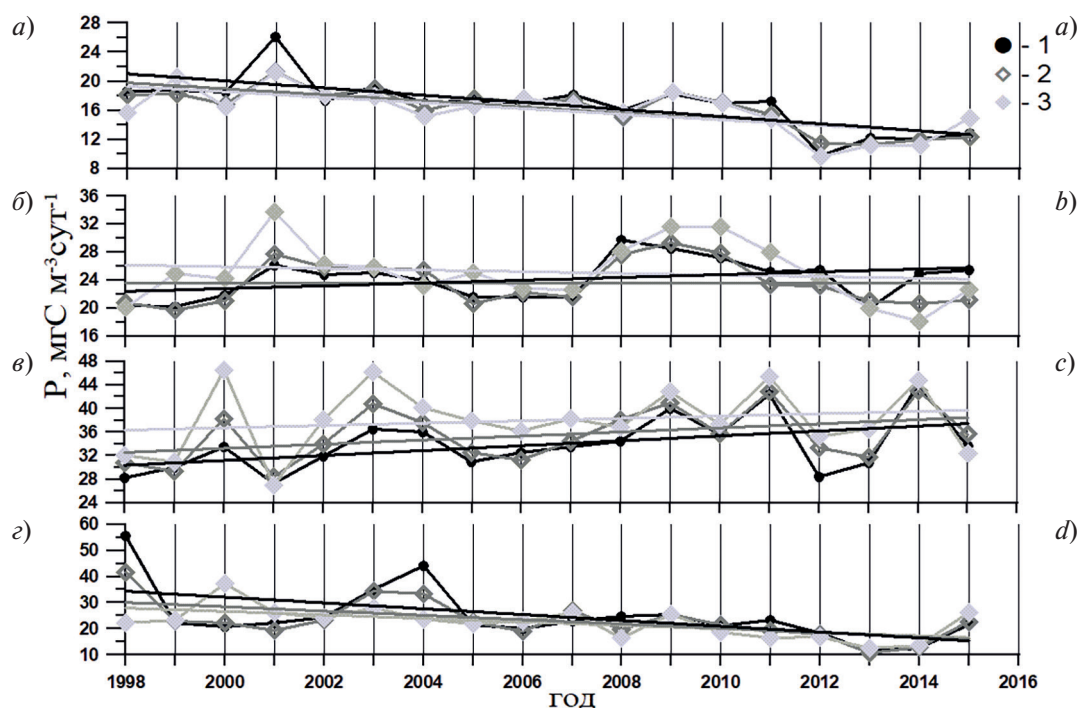


Рис. 7. Тренды сезонных изменений продукции фитопланктона в глубоководной области Черного моря в районах: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◊; а — летом, б — осенью, в — зимой, г — весной

Fig. 7. Trends of seasonal changes in phytoplankton production in the deep-water area of the Black Sea in the following areas: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◊; а — in summer, б — in autumn, в — in winter, г — in spring

Таким образом, в центральной части моря наблюдался отрицательный тренд среднегодовой продукции фитопланктона, обусловленный преимущественно снижением в летний и весенний периоды, тогда как по концентрации хлорофилла статистически значимое снижение отсутствовало. Достоверный отрицательный наклон для концентрации хлорофилла и первичной продукции отмечен в летний период. При этом, тренд температуры воды в поверхностном слое по всей глубоководной части Черного моря не был выражен и наблюдался только в западном районе по среднегодовым данным. Статистически значимое повышение температуры отмечено лишь в холодный сезон по всей рассматриваемой акватории. Потепление воды в зимний период могло снизить перемешивание верхнего и глубинного слоев, и, соответственно, уменьшить поступление биогенных веществ в зону фотосинтеза, а также привести к более раннему установлению стратификации в столбе воды. Указанные причины могут сократить продолжительность цветения водорослей в холодный сезон и повлиять на снижение продуктивности в летний период.

4. Обсуждение

Большое количество работ посвящено исследованию термического состояния вод Черного моря [6, 14, 15]. За длительный временной интервал, около ста лет, наблюдалась циклическая смена холодных и теплых десятилетий без явно выраженного тренда [6, 14]. В то же время, многими авторами отмечен характерный положительный тренд за последние 50 и в особенности 30 лет [6, 14, 16], как в поверхностном, так и в глубинном слоях моря. Для черноморского бассейна с 1950-х по 2010-е гг. за различные временные отрезки даны разные вариации температурного тренда [14, 16–19]. В то время как в 1980-х — начале 1990-х отмечалось некоторое снижение, в особенности зимних температур [14, 18, 20] и слабый отрицательный тренд, в дальнейшем, с 1994 по 2010 гг. исследования температурного режима по данным спутниковых наблюдений и прямых измерений указывали на незначительное потепление воды [14, 17, 18, 20]. В других внутренних морях также наблюдается потепление [15, 21]. Например, в Балтийском море с 1990 по 2008 гг. температура поверхности моря возрастала на 0,03–0,08 °C в год [22, 23, 24]. По нашим данным за 18 лет прирост температуры воды в Черном море с 1998 по 2015 годы в глубоководной зоне различался в отдельных районах. Так, в западной глубоководной части моря повышение было более выражено и составляло 0,038 °C в год, тогда как в других глубоководных районах оно не значимо статистически. То есть, нельзя сказать о явной тенденции к потеплению воды в поверхностном слое центральной части моря. Эти выводы согласуются с данными, приведенными другими авторами [25] для 1960–2015 гг. Результаты моделирования [25] показали, что температура поверхности не проявляет четкой линейной тенденции, в то время как в промежуточном холодном слое характерна слабая положительная тенденция. Отметим, что по нашим данным повышение температуры воды в исследуемые годы наблюдалось в холодный сезон.

При этом, на отдельных акваториях прибрежных районов может отмечаться прирост среднегодовой температуры за более длительные временные интервалы и последние два десятилетия [26]. Это подчеркивает важность выделения различных районов для исследования процессов, протекающих в море, и отдельного анализа прибрежных и глубоководных зон. В данной работе проводился анализ температуры воды главным образом для оценки первичной продукции фитопланктона. По многолетним наблюдениям среднегодовых величин концентрации хлорофилла и первичной продукции в центральной части Черного моря выявлено достоверное снижение только продукции за 18 лет. По расчетным данным величин концентрации хлорофилла в поверхностном слое, полученным по модели МГИ [11], при тенденции к снижению показателя в летний период статистически значимых трендов по среднегодовым данным обнаружено не было. Первичная продукция отражает новообразование органического вещества. Соотношение концентрации хлорофилла к органическому углероду в клетке может различаться от влияния внешних факторов. Поэтому важно оценивать эти показатели в отдельности и проводить их сопоставление. Можно предположить, что в рассмотренных случаях повышение температуры в зимний период стало следствием ослабления конвекционных потоков из глубинных слоев моря через холодный промежуточный слой и соответственно, меньшего поступления питательных веществ в зону фотосинтеза. Обменные процессы в водных массах зимой создают питательный ресурс для развития фитопланктона в течение года, что отражается на его годовом цикле [1, 5]. В теплый сезон устанавливается стратификация в столбе воды и обмен водных масс минимален. Развитие фитопланктона может осуществляться за счет оставшегося ресурса и регенерационной продукции. В исследованиях сезонной и многолетней изменчивости фитопланктона и закономерностей развития кокколитофорид в 2002–2017 гг. [5] также отмечено снижение «цветения» водорослей летом в годы с теплыми зимами. Подчеркивалась важность температуры воды в холодный период, которая отражалась не только на летнем «цветении», но и зимнем развитии

кокколитофорид [5], вместо характерных для этого сезона диатомовых водорослей. Полученные нами результаты по первичной продукции, подтверждают указанное, и отражают общий годовой ход развития фитопланктона с 1998 по 2015 гг. и характерные сезонные тенденции. Слабое повышение скорости новообразования органического вещества отмечалось зимой, понижение весной и летом. За 18-летний период происходит снижение продукции фитопланктона в теплый сезон и это отражается на среднегодовой величине. В более ранний и длительный период с 1948 до 2000 гг. по прямым измерениям трендов биомассы и первичной продукции не наблюдалось [7, 20]. Отметим, что зимой в исследуемые нами годы происходило слабое повышение продукции фитопланктона на фоне нестабильного повышения температуры в отдельных частях глубоководной зоны Черного моря и это может быть связано не только с температурой, но и сменой видового состава [1, 5]. В других морях наблюдается рост всех характеристик [21, 27]. Причины зимнего «цветения» в ряде морей в глубоководных районах схожи с черноморскими [21, 27]. Однако существуют региональные особенности и различные факторы, влияющие на первичную продукцию и развитие фитопланктона. Перемешивание водных масс определяется кроме температуры воды соленостью и ветровым воздействием, которое усиливает турбулентность, а также способствует обмену вод прибрежных и глубоководных районов. По метеорологическим данным вблизи прибрежной метеостанции г. Геленджика отмечено ослабление ветровой активности последние десятилетия, что ведет к уменьшению дрейфовых течений, в том числе потеплению [26]. Это может вносить вклад в обменные процессы водных масс и отражаться на первичной продукции фитопланктона. Из проведенного анализа следует, что процесс глобального потепления, на данном этапе слабо затронул продуктивность фитопланктона и экосистему Черного моря. Однако наметившиеся тенденции могут повлечь к более заметным изменениям.

5. Выводы

Таким образом, в глубоководной зоне Черного моря среднегодовое повышение температуры различалось в отдельных районах: 1) в западном циклональном круговороте — на $0,038\text{ }^{\circ}\text{C}$; или на 4% за 18-летний период; 2) в восточном циклональном круговороте и Батумском антициклоне статистически значимого повышения по среднегодовым данным выявить не удалось. По среднесезонным данным выявлен положительный тренд температуры зимой во всех трех районах. Статистически значимых трендов концентрации хлорофилла не выявлено, хотя в летний сезон наблюдалась тенденция к снижению. Средняя многолетняя продукция варьировала в трех районах в пределах $24,6 \pm 2,8$ – $25,4 \pm 3,2\text{ мгС сут}^{-1}\text{ м}^{-3}$ в поверхностном слое моря. Отмечен слабый отрицательный тренд первичной продукции в глубоководной части моря и в антициклональном круговороте близ Батуми, преимущественно за счет теплого периода. Это может быть результатом снижения обменных процессов водных масс в глубоководной области из-за участвовавших теплых зим. Описанные процессы могут указывать на слабую тенденцию к общему снижению продукции фитопланктона в последние годы в Черном море. На данном этапе это не повлияло существенно на экосистему, но в дальнейшем может привести к перестройке фитопланктонного сообщества и снижению рыбных запасов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации 121041400077–1) и частично в рамках государственного задания по теме № 0827–2018–0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center IBSS on the topic “Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of aquatic organisms and their populations in biotopes with different physicochemical regimes” (state registration number 121041400077–1). The study was carried out partly within the framework of the state task on theme (0827–2018–0002) “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary research of the processes of construction and evolution of the marine environment and mathematical modeling using data from remote and in situ measurements”.

Литература

1. Микаэлян А.С. Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Черного моря: Дис... докт. биол. Наук. М., 2018. 266 с.
2. Финенко З.З., Мансурова И.М., Суслин В.В. Динамика концентрации хлорофилла *a* в Чёрном море по спутниковым измерениям // Морской биологический журнал. 2019. Т. 4, № 2. С. 87–95. doi:10.21072/mbj.2019.04.2.09
3. Finenko Z.Z., Suslin V.V., Kovaleva I.V. Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // Океанология. 2014. Vol. 54. № 5. P. 635–645. doi:10.7868/S0030157414050062
4. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O., Basturk O., Finenko Z.Z., Nikonov S., Vedernikov V.I. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data // Journal of Marine Systems. 2002. V. 36 Issue 3–4 P. 145–160. doi:10.1016/S0924–7963(02)00184–7
5. Востоков С.В., Лобковский Л.И., Востокова А.С., Соловьев Д.М. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла *a* // Доклады академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 99–103. doi:10.31857/S0869–5652485199–103
6. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // Journal of Marine Systems. 2006. V. 60, P. 235–254. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.011
7. Кривенко О.В., Пархоменко А.В., Чурилова Т.Я., Финенко З.З., Суслин В.В. Реанализ долговременных рядов изменения биомассы фитопланктона в открытой части Чёрного моря по результатам натурных и спутниковых наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь: 2012. Т. 2. № 26. С. 185–194.
8. Mikaelyan A.S., Mosharova S.A., Kubryakov A.A., Pautova L.A., Fedorova A., Chasovnikova V.K. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea // Journal of Marine Systems. 2020. Vol. 208. (103368) P. 1–16. doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103368
9. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт. 2011. 212 с.
10. Suslin V.V., Churilova T. Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and colored detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean color scanners // International Journal of Remote Sensing. 2016. V. 37, N 18. P. 4380–4400. doi:10.1080/01431161.2016.1211350
11. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Ли М.Е. Мончева С., Финенко З.З. Концентрация хлорофилла *a* в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. doi:10.7868/S2073667318030085
12. Финенко З.З., Ковалева И.В., Суслин В.В. Использование спутниковых данных для оценки удельной скорости роста фитопланктона в поверхностном слое Черного моря // Биология моря. 2019. Т. 45, № 5. С. 334–341. doi:10.1134/S0134347519050115
13. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М., Бастюрк О. Изменчивость фотосинтетических параметров фитопланктона в поверхностном слое черного моря // Океанология. 2002. Т. 42, № 1. С. 60–75.
14. Белокопытов В.Н. О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. 2013. Т. 7. С. 226–230.
15. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M. World Ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010 // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39. L10603. doi:10.1029/2012GL051106
16. Kazmin A.S., Zatsepin A.G. Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // Journal of Marine Systems. 2007. V. 68, № 1. P. 293–301.
17. Полонский А.Б., Шокурова И.Г., Белокопытов В.Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2013. Т. 6. С. 27–41.
18. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability / The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. Part Q, Vol. 5. 2008. P. 255–275.
19. Kara A.B., Barron C.N., Wallcraft A.J., Oguz T., Casey K.S. Advantages of fine resolution SSTs for small ocean basins: Evaluation in the Black Sea // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113, C08013.
20. Ковалёва И.В. Межгодовые и сезонные изменения концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в глубоководной части Черного моря // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 50, № 3. С. 38–50.
21. Зуенко Ю.И., Перишина Е.А. Изменчивость температуры воды и сроков весеннего «цветения» на нерестилищах сардины и иваси в Японском море // Известия ТИНРО. 2011, Т. 165. С. 251–264.
22. Lehmann A., Getzlaff K., Harlab J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009 // Climate Research. 2011. V. 46. P. 186–195. doi:10.3354/cr00876

23. Кудрявцева Е.А. Роль геоэкологических факторов в распределении первичной продукции российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря: Дис ... канд. геогр. наук. Калининград, 2017. 159 с.
24. Voss R., Petereit C., Schmidt J.O., Lehmann A., Makarchouk A., Hinrichsen H.H. The spatial dimension of climate-driven temperature change in the Baltic Sea and its implication for cod and sprat early life stage survival // *Journal of Marine Systems*. 2012. Vol. 100–101. P. 1–8. doi:10.1016/j.jmarsys.2012.03.009
25. Miladinova S.A., Stips E., Garcia-Gorritz D., Macias Moy. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5624–5644. doi:10.1002/2016JC012644
26. Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И. Ветровые циклы и климатические тренды Черного моря / под ред. Кабатченко И.М. // *Труды ГОИН имени Н.Н. Зубова. Исследования океанов и морей*. 2018. Вып. 219. С. 101–123.
27. Буканова Т.В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: Дис. ...канд. геогр. наук. Калининград. 2014. 142 с.

References

1. Mikaelyan A.S. Time dynamics of phytoplankton in the deep-water basin of the Black Sea: Diss. ...Doct. Biol. Sci. Moscow. 2018, 266 p. (In Russian).
2. Finenko Z.Z., Mansurova I.M., Suslin V.V. Dynamics of chlorophyll a concentration in the Black Sea on satellite data. *Marine Biological Journal*. 2019, 4, 2, 87–95 (in Russian). doi:10.21072/mbj.2019.04.2.09
3. Finenko Z.Z., Suslin V.V., Kovaleva I.V. Seasonal and long-term dynamics of the chlorophyll concentration in the Black Sea according to satellite observations. *Oceanology*. 2014, 54, 5, 596–605. doi:10.1134/S0001437014050063
4. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O., Basturk O., Finenko Z.Z., Nikonov S., Vedernikov V.I. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data. *Journal of Marine Systems*. 2002, 36, 3–4, 145–160. doi:10.1016/S0924–7963(02)00184–7
5. Vostokov S.V., Lobkovskii L.I., Vostokova A.S., Solov'ev D.M. Seasonal and interannual variability of phytoplankton in the Black Sea on the basis of remote sensing data and in situ measurements of chlorophyll-a. *Doklady Earth Sciences*. 2019, 485, 1, 293–297. doi:10.1134/S1028334X19030097
6. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *Journal of Marine Systems*. 2006, 60, 235–254. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.011
7. Krivenko O.V., Parhomenko A.V., Churilova T. Ya., Finenko Z.Z., Suslin V.V. Reanalysis of long-term series of changes in phytoplankton biomass in the open part of the Black Sea based on the results of field and satellite observations. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoi i Shelfovoi Zon i Kompleksnye Issledovaniya Resursov Shelfa*. 2012, 2, 26, 185–194 (in Russian).
8. Mikaelyan A.S., Mosharova S.A., Kubryakov A.A., Pautova L.A., Fedorova A., Chasovnikova V.K. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea. *Journal of Marine Systems*. 2020, 208, 103368, 1–16. doi:10.1016/j.jmarsys.2020.103368
9. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Oceanography of the Black Sea. *NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol*, 2011, 209 p. (In Russian).
10. Suslin V.V., Churilova T. Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners. *International Journal of Remote Sensing*. 2016, 37, 18, 4380–4400. doi:10.1080/01431161.2016.1211350
11. Suslin V.V., Churilova T. Ya., Lee M., Moncheva S., Finenko Z.Z. Comparison of the Black Sea chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS and MODIS instruments. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 64–72 (in Russian). doi:10.7868/S2073667318030085
12. Finenko Z.Z., Kovalyova I.V., Suslin V.V. Use of satellite data for the estimation of the specific growth rate of phytoplankton in the surface layer of the Black Sea. *Russian Journal of Marine Biology*. 2019, 45, 4, 313–319. doi:10.1134/S1063074019040059
13. Finenko Z.Z., Churilova T. Ya., Sosik H.M., Bastruk O. Variability of photosynthetic parameters of the surface phytoplankton in the Black Sea. *Oceanology*. 2002, 1, 42, 53–67.
14. Belokopytov V.N. On the climatic variability of the Black Sea thermohaline structure. — *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnye issledovaniya resursov shelfa*. 2013, 27, 226–230 (In Russian).
15. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M. World Ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*. 2012, 39, L10603. doi:10.1029/2012GL051106
16. Kazmin A.S., Zatsepin A.G. Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing. *Journal of Marine Systems*. 2007, 68, 1, 293–301.

17. Polonskii A.B., Shokurova I.G., Belokopytov V.N. Ten-year variability of temperature and salinity in the Black Sea. *Physical Oceanography*. 2013, 6, 27–41 (in Russian).
18. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability. The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. *Berlin Heidelberg: Springer-Verlag*. V. 5, Part Q. 2018, 255–275.
19. Kara A.B., Barron C.N., Wallcraft A.J., Oguz T., Casey K.S. Advantages of fine resolution SSTs for small ocean basins: Evaluation in the Black Sea. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113, C08013.
20. Kovaleva I.V. Interannual and seasonal changes in the concentration of chlorophyll α and primary production in the deepwater section of the Black Sea. *Hydrobiological Journal*. 2014, 50, 5, 35–46. doi:10.1615/HydrobJ.v50.i5.40
21. Zuenko Yu.I., Pershina E.A. Variability of water temperature and the timing of spring “bloom” in the spawning grounds of Iwashi sardine in the Sea of Japan. *Izvestiya TINRO*. 2011, 165, 251–264 (in Russian).
22. Lehmann A., Getzlaff K., Harlab J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Climate Research*. 2011, 46, 186–195.
23. Kudryavtzeva E.A. The role of geoecological factors in the distribution of primary production in the Russian sector of the Gdansk basin of the Baltic sea: Diss. ...Cand. Geogr. Sci. Kaliningrad. 2017, 159 p. (in Russian).
24. Voss R., Petereit C., Schmidt J.O., Lehmann A., Makarchouk A., Hinrichsen H.H. The spatial dimension of climate-driven temperature change in the Baltic Sea and its implication for cod and sprat early life stage survival. *Journal of Marine Systems*. 2012, 100–101, 1–8.
25. Miladinova S.A., Stips E., Garcia-Gorritz D., Macias Moy. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017, 122, 5624–5644. doi:10.1002/2016JC012644
26. Melnikov V.A., Moskalenko L.V., Kuzevanova N.I. Black Sea wind cycles and climatic trends / ed. Kabatchenko I.M. *Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute. Ocean and Sea Research*. 2018, 219, 101–123 (in Russian).
27. Bukanova T.V. Trends in eutrophication of the southeastern Baltic Sea based on satellite data: Diss. ...Cand. Geogr. Sci. Kaliningrad. 2014, 142 p. (in Russian).

Об авторах

КОВАЛЁВА Илона Васильевна, РИНЦ AuthorID: 1039761, ORCID: 0000-0001-5430-2002,
Scopus AuthorID: 56405274600, WoS ResearcherID: AAB-4397-2019, e-mail: ila.82@mail.ru

ФИНЕНКО Зосим Зосимович, РИНЦ AuthorID: 744590, ORCID: 0000-0003-4852-341X,
Scopus AuthorID: 6603566261, WoS ResearcherID: B-7041-2018, e-mail: zosim_finenko@mail.ru

СУСЛИН Вячеслав Владимирович, РИНЦ AuthorID: 825673, ORCID: 0000-0002-8627-7603,
Scopus AuthorID: 6602501867, e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru

УДК 551.463.5

© Е. А. Аглова^{*1,2}, Д. И. Глуховец^{1,2}, 2022

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

²Московский физико-технический институт (НИУ), 141707, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

*aglova.ea@phystech.edu

ПРИМЕРЫ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ВОД НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *А* В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ БАРЕНЦЕВА И НОРВЕЖСКОГО МОРЕЙ

Статья поступила в редакцию 04.03.2022, после доработки 27.10.2022, принята в печать 11.11.2022

Аннотация

Продemonстрировано влияние динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *а* в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей, полученное на ходу судна с помощью проточного измерительного комплекса в августе 2020 г. В качестве параметра, характеризующего динамику водных масс, выбрана дивергенция поля течений, рассчитанная по данным реанализа. Применение метода скользящих корреляций позволило выделить участки маршрута с положительной и отрицательной корреляциями значений дивергенции и интенсивности флуоресценции хлорофилла *а*. Показано, что положительная корреляция формируется в результате вертикального движения вод поверхностного слоя, отрицательная — может являться следствием адвекции водных масс и суточного хода значений фотосинтетически активной радиации. Часть полученных результатов подтверждается спутниковыми данными о пространственном распределении концентрации хлорофилла *а*.

Ключевые слова: хлорофилл *а*, флуоресценция, дивергенция поля течений, поверхностный слой, спутниковые данные, фотосинтетически активная радиация, Баренцево море, Норвежское море

© Е. А. Аглова^{1,2*}, Д. И. Глуховец^{1,2}, 2022

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

²Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141707, Russia

*aglova.ea@phystech.edu

EXAMPLES OF THE WATER DYNAMICS INFLUENCE ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL *A* FLUORESCENCE INTENSITY IN THE SURFACE LAYER OF THE BARENTS AND NORWEGIAN SEAS

Received 04.03.2022, Revised 27.10.2022, Accepted 11.11.2022

Abstract

The influence of water dynamics on the spatial distribution of chlorophyll *a* fluorescence intensity in the surface layer of the Barents and Norwegian Seas, obtained during the 80-th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” using the flow-through measuring complex in August 2020, was demonstrated. The divergence of the current velocity field, calculated according to reanalysis data, was chosen as a parameter describing the dynamics of water masses. The application of the current sliding correlations method allowed us to identify areas of the track with positive and negative correlations between the values of divergence and chlorophyll *a* fluorescence intensity. It is shown that a positive correlation is formed as a result of the vertical movement of the water surface layer, a negative one — may be a consequence of the water masses advection and the daily changes of the values of photosynthetically active radiation. The part of obtained results is confirmed by satellite data on the spatial distribution of chlorophyll *a* concentration.

Keywords: chlorophyll *a*, seawater fluorescence, divergence of the current velocity field, surface layer, satellite data, photosynthetically active radiation, Barents Sea, Norwegian Sea

Ссылка для цитирования: Аглова Е.А., Глуховец Д.И. Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *а* в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 54–62. doi:10.48612/fpg/dvvv-rrk5–5p2b

For citation: Aglova E.A., Glukhovets D.I. Examples of the Water Dynamics Influence on the Spatial Distribution of Chlorophyll *a* Fluorescence Intensity in the Surface Layer of the Barents and Norwegian Seas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 54–62. doi:10.48612/fpg/dvvv-rrk5–5p2b

1. Введение

Движение водных масс оказывает воздействие на распределение биооптических характеристик морской воды [1–3]. Возникающие процессы апвеллинга, адвекции и вертикального перемешивания перераспределяют в толще морской воды фитопланктон и необходимые для его развития минеральные элементы [4, 5]. В результате течения оказывают влияние на пространственно-временное распределение биооптических характеристик поверхностного слоя морской воды, в частности, на интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (Хл), характеризующую биомассу фитопланктона. Пространственное распределение биооптических характеристик, связанных с фитопланктоном, может быть эффективно исследовано оптическими методами, например, флуоресцентными [6–8]. Цель работы — демонстрация примеров связи пространственного распределения интенсивности флуоресценции Хл (I_{fl}) в поверхностном слое морской воды с влияющими на это распределение значениями дивергенции поля поверхностных течений в Баренцевом и Норвежском морях, а также анализ механизма возникновения зарегистрированных примеров. Отметим, что на большинстве участков маршрута судна такой связи обнаружить не удалось. Это может быть следствием целого ряда причин, наиболее вероятной из которых следует считать однородность пространственного распределения биооптических характеристик на этих участках. В таком случае перемешивание вод не может привести к изменчивости концентрации Хл. Кроме того, на значения I_{fl} помимо концентрации этого пигмента может влиять ряд факторов, например, видовой состав фитопланктона, физиологическое состояние клеток и адаптация к минеральному питанию и световому режиму [9]. В данной работе рассматривается влияние светового режима, анализ влияния остальных факторов представляет собой предмет для отдельного исследования.

2. Аппаратура и методика

В работе использованы результаты непрерывных судовых измерений биооптических характеристик вдоль маршрута судна. Измерения выполнены в ходе 80-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Баренцевом и Норвежском морях в августе 2020 г. [10]. Величина интенсивности флуоресценции Хл получена с помощью проточного двухканального флуориметра ПФД-2М, входящего в состав судового измерительного комплекса [11]. Глубина водозабора составляла 2–3 м, пространственное разрешение — около 50 м. После калибровки показания прибора приводятся к абсолютным (рамановским) единицам (R.U.), что позволяет сравнивать полученные результаты с данными других флуориметрических измерений.

В рейсе также проводилась непрерывная попутная регистрация падающего на поверхность морской воды потока фотосинтетически активной радиации (ФАР), измеряемая датчиком LI-COR.

Расчет значений дивергенции поля течений в поверхностном слое производился с помощью данных, полученных на сайте океанографического реанализа CMEMS (англ. Copernicus Marine Environment Monitoring Service), портал системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus, <https://resources.marine.copernicus.eu>, продукт ARCTIC_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_002_001_a с пространственным разрешением 12,5 км и временным — 1 ч. В основе данных использованного продукта лежит модель HYCOM [12] с еженедельной ассимиляцией данных с применением фильтра Калмана [13].

К сожалению, в рейсе, данные которого анализируются в статье, судовой ADCP не работал, и мы не можем подтвердить качество данных реанализа судовыми измерениями. Приведенное в отчете научно-исследовательской лаборатории ВМС США за 2020 г. сравнение данных этой модели с результатами прямых определений скорости течений, полученными с помощью буев, показало, что отклонения средних значений скорости течений в верхнем слое океана не превосходят 10% [14]. Проверка точности данных используемой модели в исследуемом регионе была проведена нами в июне 2021 г. в 1-м этапе 83-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», где выполнялись попутные измерения скорости течений. Их результаты показали согласие с данными реанализа в области разделения Норвежского течения на Нордкапское и Шпицбергенское¹.

Значения дивергенции поля течений в поверхностном слое усреднялись за сутки (± 12 часов к моменту судового измерения проточным комплексом) для исключения вклада приливов и отливов, содержащихся в используемом продукте. Из-за существенного различия пространственного разрешения данных реанализа и результатов судовых непрерывных измерений каждому значению дивергенции соответствует ряд значений интенсивности флуоресценции Хл. Для дальнейшей обработки использованы медианные значения

¹ <https://www.ocean.ru/index.php/vse-novosti/item/2152-pervyj-etap-83-go-rejsa-nis-akademik-mstislav-keldysh>

этих рядов. Использование ежечасного реанализа при средней скорости движения судна 9 узлов приводит к удвоению числа анализируемых для каждой точки участка данных (в большинстве случаев судно проходит каждый пиксель реанализа более чем за час, что соответствует двум последовательным временным слоям значений дивергенции). Среднее количество точек на каждом участке $N = 20$.

Данные судовой метеостанции, полученные в рейсе, показали преобладание ветров СЗ направления со скоростью 9–12 м/с, реже фиксировались ветра СВ направления со скоростью 7–10 м/с. Максимальная скорость ветра составила 14 м/с, минимальная — 3 м/с. Отметим, что результаты реанализа CMEMS учитывают ветровое перемешивание.

Для поиска участков маршрута с наибольшими значениями коэффициентов корреляции между значениями дивергенции поля течений и измеренной на ходу судна интенсивностью флуоресценции Хл проведены расчеты методом скользящей корреляции с выбранным масштабом 120 км [15]. Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$R(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y},$$

где $\text{cov}(x, y)$ — ковариация величин x и y , σ — среднеквадратичное отклонение.

Выбор масштаба для проведения расчетов обусловлен размерами проявлений исследуемых объектов — фронтальных зон и мезомасштабных вихрей. Значимость найденных коэффициентов корреляции R определялась по уровню $p = 0,01$. Для исключения влияния ошибок, обусловленных слабой изменчивостью интенсивности флуоресценции Хл на квазиоднородных участках маршрута, использовался критерий $|\Delta I_{fl}| > 0,1 \text{ R.U.}$ Применение этого критерия позволяет исключить из рассмотрения участки, где влияние динамики слабо влияет на пространственное распределение I_{fl} .

Пространственные распределения концентрации Хл (стандартный продукт `chlor_a` [16]) получены по данным спутниковых сканеров цвета MODIS/Aqua (5 августа 2020 г., 12:10 UTC) и MODIS/Terra (16 августа 2020 г., 11:35 UTC). Пространственное разрешение данных — 1 км.

3. Результаты

Карта течений вод поверхностного слоя морской воды и рассчитанные значения дивергенции поля течений, построенные по данным реанализа, показаны на рис. 1. Данные усреднены за период проведения судовых измерений (5–23 августа 2020 г.). Наибольшая неоднородность структуры течений наблюдается в областях разделения Норвежского Атлантического течения на Нордкапское и Шпицбергенское (севернее резкого свала глубин в районе 70–71°с.ш., 17–18°в.д.) и Полярного фронта [17]. В области 70°с.ш., 3°в.д. отчетливо проявляется конвективная структура в Лофотенской котловине [18]. Динамика вод включает в себя вертикальные движения водных масс, что приводит к изменениям пространственного распределения биогеохимических характеристик. Эти проявления могут быть зарегистрированы в пространственных распределениях интенсивности флуоресценции в поверхностном слое.

Результаты расчетов скользящих корреляций между значениями дивергенции поля течений и измеренной на ходу судна интенсивностью флуоресценции Хл с масштабом 120 км представлены на рис. 2. Высокие абсолютные значения корреляции зарегистрированы в областях неоднородного поля течений юго-западнее Шпицбергена. Вариации в пороговых значениях R , значимых по уровню $p = 0,01$, в различных областях рисунка обусловлены попаданием разного числа точек в выбранный масштаб обработки данных. Важно отметить, что при использованном в работе подходе на значения коэффициентов корреляции на отдельных участках влияет изменчивость значений дивергенции, а не их абсолютная величина и знак в данной области. Характеристика рассматриваемых в работе участков приведена в таблице.

4. Обсуждение

Предполагая вклад изменчивости плотности морской воды по сравнению со скоростью течений малым, можно записать упрощенное уравнение непрерывности:

$$\text{div} V = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0,$$

где u, v, w — горизонтальные и вертикальная составляющие вектора скорости течений.

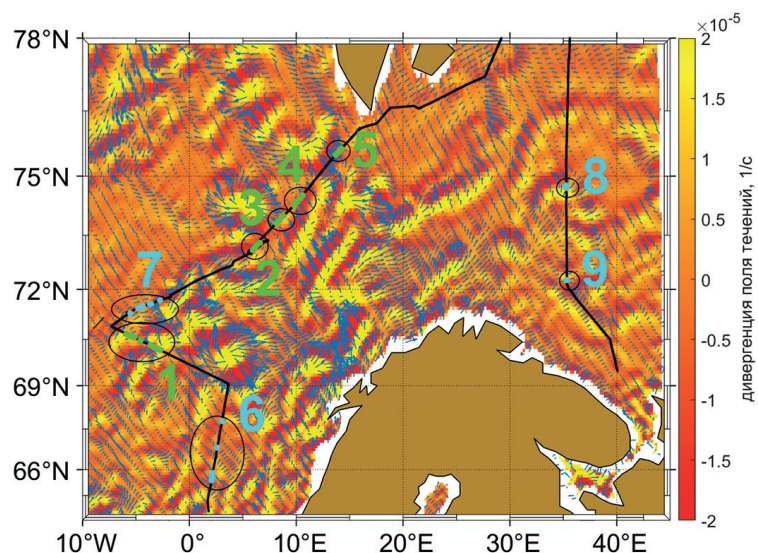


Рис. 1. Карта течений (синие стрелки, максимальная длина соответствует 0,35 м/с) и значения дивергенции поля течений (оттенки оранжевого), с наложенной частью маршрута 80-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», 5–23 августа 2020 г. (черная линия). Зеленым цветом выделены участки со значимой по уровню $p = 0,01$ положительной корреляцией между значениями интенсивности флуоресценции Хл и дивергенции, голубым — с отрицательным коэффициентом корреляции. Цифрами приведена нумерация данных участков

Fig. 1. The map of currents (blue arrows, the maximum length corresponds to 0.35 m/s) and the values of divergence of the currents field (shades of orange), with the added part of the route of 80-th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”, August 5–23, 2020 (black line). Areas with a significant positive correlation between the values of the Chl fluorescence intensity and divergence are highlighted in green, the negative correlation areas are highlighted in cyan. The numbers indicate the numbering of these areas

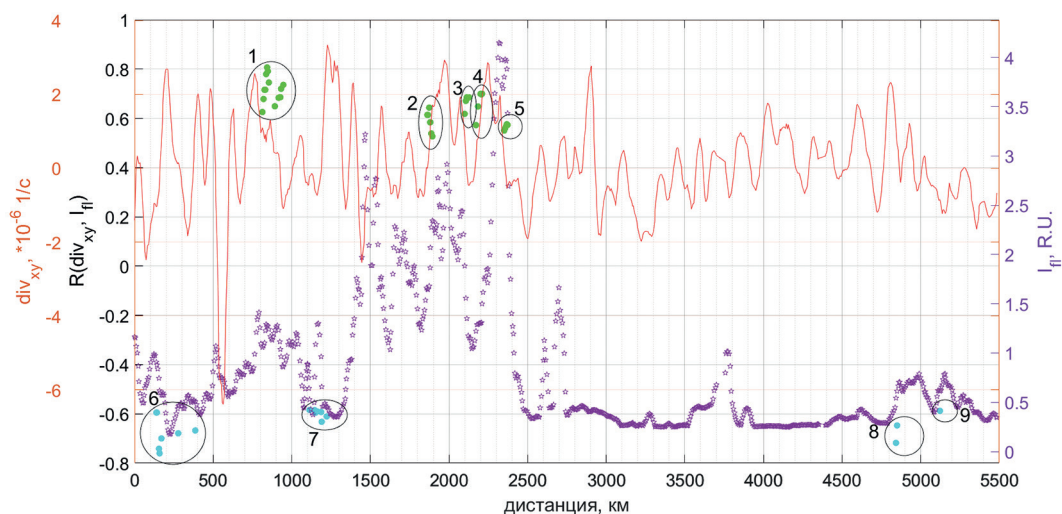


Рис. 2. Изменение медианных значений интенсивности флуоресценции Хл (фиолетовым) и значения дивергенции поля течений (коричневым) вдоль трека судна. Кружками выделены положения участков со значимыми по уровню $p = 0,01$ коэффициентами корреляции R между значением дивергенции поля течений и интенсивностью флуоресценции Хл (зеленые — с положительным значением R , голубые — с отрицательным R)

Fig. 2. Change in median values of the Chl fluorescence intensity (purple) and the value of divergence of the currents field (brown) along the R/V track. The circles highlight the positions of the route tracks with significant (p -value = 0.01) correlation coefficients (R) between the value of the divergence of the current field and the Chl fluorescence intensity (green — with a positive value of R , blue — with a negative R)

Таблица
 Table

Характеристика рассматриваемых участков. Среднее количество точек на каждом участке $N = 20$

Characteristics of the considered route tracks. The average number of points in each plot is $N = 20$

Номер участка	R	Доверит. интервал	Изменение I_{Π}	Изменение $divV_{xy}$	$ \Delta div , *10^{-6}$	Знак div	Причина
1	0,7	(0,24, 0,9)	↓	↓	3,6	+	Уменьшение скорости подъёма
2	0,6	(0,07, 0,87)	↑	↑	3,6	+	Увеличение скорости подъёма
3	0,65	(0,15, 0,89)	↓	↓	2,3	+	Уменьшение скорости подъёма
4	0,63	(0,12, 0,88)	↑	↑	3,2	+	Увеличение скорости подъёма
5	0,57	(0,02, 0,85)	↓	↓	2,5	+	Уменьшение скорости подъёма
6	-0,7	(-0,90, -0,25)	↓↑	↑↓	4,8	+	Адвекция
7	-0,6	(-0,87, -0,07)	↓	↑	4,1	-	Дневной ход ФАР
8	-0,7	(-0,90, -0,25)	↑	↓	2,6	+	Не связана с верт. динамикой
9	-0,59	(-0,86, -0,05)	↑	↓	0,4	-	Не связана с верт. динамикой

Величина $divV_{xy} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy}$ рассчитывается из данных реанализа, а компонента $\frac{dw}{dz} = -divV_{xy}$ отвечает за

выполнение закона сохранения массы. С учетом вертикального направления оси z и граничного условия $w(0) = 0$ получаем, что отрицательные значения $divV_{xy}$ соответствуют опусканию поверхностных вод, а положительные значения — подъему к поверхности вод из нижележащих слоев.

Положительная корреляция формируется как при непосредственном увеличении концентрации фито-планктона, так и поступлении биогенных элементов, необходимых для его развития, вследствие увеличения интенсивности апвеллинга (рис. 1,2, табл. 1, участки 2 и 4). Аналогично, положительная корреляция может наблюдаться при уменьшении скорости подъема вод с одновременным уменьшением интенсивности флуоресценции Хл (участки 1, 3 и 5).

Объяснить причины отрицательной корреляции исследуемых характеристик в рамках такой простой модели не удастся. Как будет показано ниже, полученные в результате расчета значения отрицательной корреляции связаны не с влиянием подъема или опускания вод на интенсивность флуоресценции Хл в поверхностном слое морской воды, а с другими факторами. Фактически такая ситуация эквивалентна случаю отсутствия статистической связи, то есть незначимым или низким значениям $R(divV_{xy}, I_{\Pi})$. Для поиска и анализа приводящих к случаю отрицательной корреляции факторов использовались данные о направлении течений, спутниковые данные о концентрации Хл и результаты судовых измерений потока ФАР.

Значимая отрицательная корреляция зарегистрирована на четырех участках маршрута. Рассмотрим подробнее первые два (6, 7). Для этих областей построены карты поверхностных течений, усредненных за сутки до проведения судовых измерений (рис. 3). Следует отметить, что для участка 6 удалось подобрать спутниковые данные, соответствующие дню проведения судовых измерений. Для 7-го из-за плотной облачности разница составила неделю. В области 6-го участка с отрицательной корреляцией направление течений в поверхностном слое северо-западное. Спутниковые данные о пространственном распределении концентрации Хл показывают, что к юго-востоку от исследуемого участка маршрута концентрация Хл имеет высокую изменчивость. Важно отметить, что на этом участке при наиболее интенсивном вертикальном движении вод наблюдаются наименьшие значения I_{Π} (рис. 2, около 200 км). По-видимому, интенсивное вертикальное движение блокирует горизонтальный перенос вод, характеризуемых более высокими значениями I_{Π} . Это и формирует регистрируемую отрицательную корреляцию.

В области 7-го участка со значимой отрицательной корреляцией наблюдается интенсивная вихревая динамика (рис. 3, справа). Это не позволяет использовать для анализа спутниковые данные, полученные с недельным интервалом от времени судовых измерений.

В качестве еще одного фактора, способного повлиять на связь динамики вод и интенсивности флуоресценции Хл, рассмотрен световой режим. Для анализа влияния светового режима на интенсивность флуоресценции Хл использовались данные попутных непрерывных измерений потока ФАР. Фитопланктон может адаптироваться к различным условиям освещения [9], что в ряде случаев приводит к увеличению интенсивности флуоресценции Хл в темное время суток и наоборот. Для оценки влияния этого фактора построена широтная зависимость значений ФАР и интенсивности флуоресценции Хл вдоль трека судна на 7 участке (рис. 4). Данный участок выделен на графике вертикальными линиями. Уменьшение сигнала

Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*...
Examples of the water dynamics influence on the spatial distribution of chlorophyll *a*...

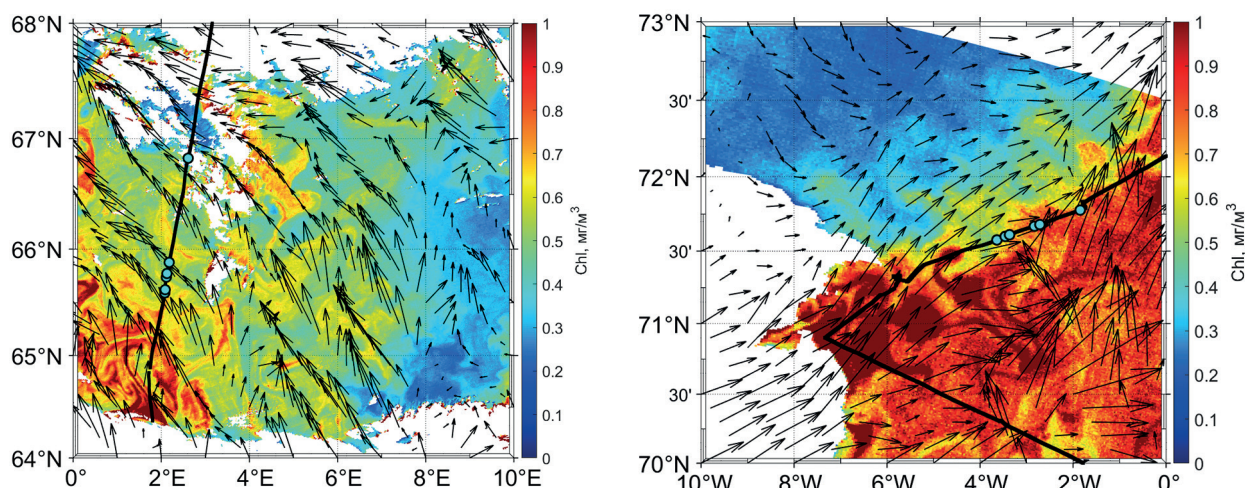


Рис. 3. Карта течений по данным реанализа (черные стрелки), усредненная за сутки до судовых измерений и пространственное распределение концентрации Хл (цветом) по данным MODIS (слева: MODIS/Aqua 5 августа 2020 г., 12:10 UTC, справа: MODIS/Terra 16 августа 2020 г., 11:35 UTC). Голубыми кружками обозначены участки со значимыми отрицательными значениями *R*, белые области соответствуют отсутствию данных вследствие облачности или выходу за границу области съёмки. Слева: участок трека 6 (05.08.2020), справа: участок трека 7 (09.08.2020). Максимальная длина стрелок соответствует 0,4 м/с

Fig. 3. Current map according to reanalysis data (black arrows) averaged a day before shipboard measurements and satellite concentration of Chl (in color) according to MODIS data (left: MODIS/Aqua, August 5, 2020, 12:10 UTC; right: MODIS/Terra, August 16, 2020, 11:35 UTC). Cyan circles indicate areas with significant negative *R* values, white areas correspond to the lack of data due to clouds or places being out of image. Left: area of track 6 (5.08.2020), right: area of track 7 (09.08.2020). The maximum length of the arrows corresponds to 0.4 m/s

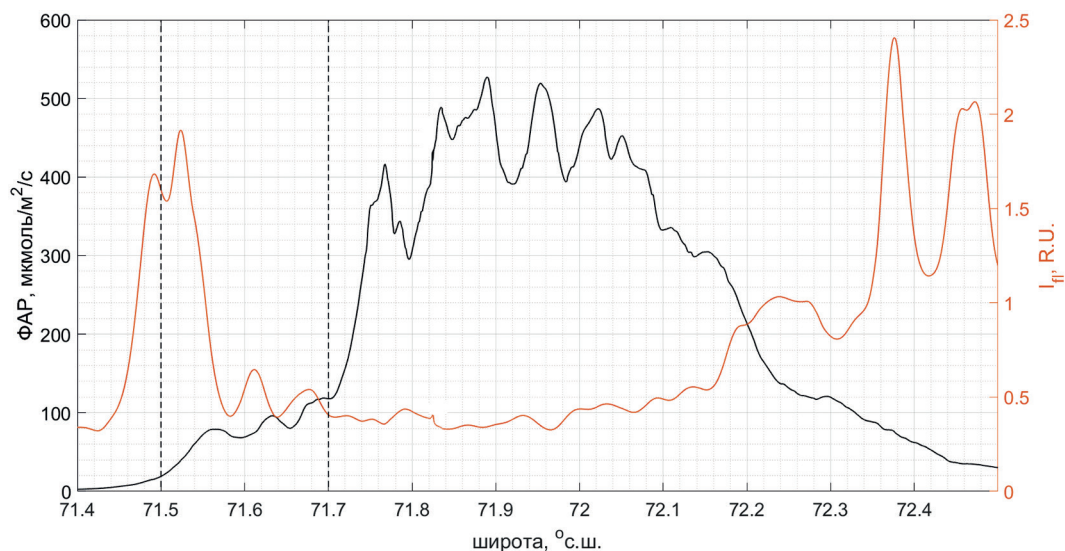


Рис. 4. Распределения значений ФАР и интенсивности флуоресценции Хл вдоль трека судна по данным судовых измерений 9 августа 2020 г. Выделенный вертикальными линиями участок соответствует области 7 с отрицательной корреляцией (рис. 2)

Fig. 4. The distributions of the PAR and Chl fluorescence intensity values along the R/V track according to shipboard measurements on August 9, 2020. The area highlighted by vertical lines corresponds to the region 7 with negative correlation (Fig. 2)

ла флуоресценции около 71,5°с.ш. соответствует увеличению уровня ФАР, зарегистрированного в начале светового дня. Кроме того, положительные значения дивергенции на этом участке указывают на подъем вод к поверхности. При этом клетки фитопланктона попадают в более освещенные слои, что дополнительно усиливает влияние фотоадаптации, способствуя еще большему подавлению уровня интенсивности

флуоресценции [19]. Таким образом, определяющей значимую отрицательную корреляцию на данном участке маршрута причиной может являться поток фотосинтетически активной радиации, влияние которой способно перекрывать противоположный вклад поверхностных течений, способствующих увеличению флуоресценции Хл. Также интересно отметить, что максимумы интенсивности флуоресценции Хл зарегистрированы в темное время суток. Для подробного анализа влияния уровня ФАР на I_{fl} требуется дополнительная информация о фитопланктоне.

Связь значений исследуемых характеристик на 8 и 9-м участках объясняется увеличением концентрации Хл вследствие адвекции водных масс.

5. Выводы

Исследованы примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции Хл в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей. Это влияние складывается из множества факторов, из которых порой сложно выделить доминирующий. В работе использовался метод скользящих корреляций, примененный к данным судовых непрерывных измерений интенсивности флуоресценции хлорофилла вдоль маршрута судна, данные реанализа, а также данные спутниковых сканеров цвета MODIS о концентрации Хл. Зарегистрированы области с положительными и отрицательными корреляциями между значениями дивергенции и интенсивностями флуоресценции Хл. Существование областей с положительной корреляцией объясняется увеличением концентрации фитопланктона в поверхностном слое вод вследствие увеличения интенсивности подъема как самих водорослей, так и необходимых для их развития биогенных элементов. При уменьшении интенсивности подъема поверхностных вод наблюдается соответствующее уменьшение интенсивности флуоресценции Хл. Отрицательная корреляция может формироваться под воздействием дополнительных факторов — адвекции водных масс, отличающихся по содержанию Хл, и суточного хода значений ФАР. Следует отметить, что на большинстве участков маршрута судна зарегистрировать влияние динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции Хл не удалось. Это может быть связано с целым рядом причин, наиболее вероятной из которых следует считать однородность пространственного распределения биооптических характеристик на большей части маршрута. При продолжении исследований целесообразно рассмотреть другие параметры — показатель ослабления морской воды и ротор поля течений.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ю.А. Гольдину, С.В. Вазюля и П.С. Вреземской за полезное обсуждение, А.Н. Новигатскому за данные судовой метеостанции, а также рецензентам за внимательное прочтение статьи и ценные замечания.

Финансирование

Данные судовых измерений получены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2022–0003. Обработка и анализ результатов флуоресцентных измерений выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4561.2021.1.5; анализ влияния динамики вод — при поддержке гранта РНФ № 21–77–10059. Гранты предоставлены через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Funding

Shipboard measurement data were obtained within the framework of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, theme No. FMWE-2022-0003. Processing and analysis of the results of fluorescence measurements were supported by the grant of the President of the Russian Federation МК-4561.2021.1.5; analysis of the influence of water dynamics — with the support of the Russian Science Foundation grant No. 21-77-10059. Grants provided through the Shirshov Institute of Oceanology, RAS.

Литература

1. Hunt Jr. G.L., Drinkwater K.F., Arrigo K., Berge J., Daly K.L., Danielson S., Daase M., Hop H., Isla E., Karnovsky N., Laidre K. Advection in polar and sub-polar environments: Impacts on high latitude marine ecosystems // Progress in Oceanography. 2016. Vol. 149. P. 40–81. doi:10.1016/j.pocean.2016.10.004

2. Салюк П.А., Глуховец Д.И., Липинская Н.А., Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Пономарев В.И., Аглова Е.А., Артемьев В.А., Латушкин А.А., Майор А.Ю. Изменчивость биооптических характеристик морской поверхности в районе Фолклендского течения и Патагонского шельфа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 200–213. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213
3. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Биооптические характеристики на крупномасштабном полигоне в северной тропической зоне атлантического океана и их связь с динамикой вод // Океанология. 2022. Т. 62, № 1. С. 32–40. doi:10.31857/S0030157422010099
4. Wassmann P., Kosobokova K.N., Slagstad D., Drinkwater K.F., Hopcroft R.R., Moore S.E., Ellingsen I., Nelson R.J., Carmack E., Popova E., Berge J. The contiguous domains of Arctic Ocean advection: trails of life and death // Progress in Oceanography. 2015. Vol. 139. P. 42–65. doi:10.1016/j.pocean.2015.06.011
5. Randelhoff A., Sundfjord A. Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing // Ocean Science. 2018. Vol. 14, N 2. P. 293–300. doi:10.5194/os-14-293-2018
6. Lorenzen C.J. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1966. Vol. 13, N 2. P. 223–227. doi:10.1016/0011-7471(66)91102-8
7. Нагорный И.Г., Салюк П.А., Майор А.Ю., Дорошенко И.М. Мобильный комплекс для оперативного исследования водных акваторий и приводной атмосферы // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 1. С. 103–106. doi:10.7868/S0032816214010182
8. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // Oceanologia. 2020. Vol. 62, N 3. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
9. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
10. Ключевкин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Кравчишина М.Д. Исследования Европейской Арктики в 80-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 156–158. doi:10.31857/S0030157421010093
11. Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А., Григорьев А.В., Артемьев В.А. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60, № 5. С. 814–822. doi:10.31857/S0030157420040103
12. Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnal-Cartesian coordinates // Ocean Modelling. 2002. Vol. 4, N 1. P. 55–88.
13. Kholod A.L. Overview of the Copernicus marine environment monitoring service products available for the Arctic region // Physical Oceanography. 2017. N 2. P. 25–35.
14. Metzger E.J., Hogan P.J., Shriver J.F. et al. Validation Test Report for the Global Ocean Forecast System 3.5–1/25 degree HYCOM/CICE with Tides // Naval Research LabS Washington DC Washington United States. URL: https://www.hycom.org/attachments/366_HYCOM-NCODA_VTR_I_Memo_Report_9148.pdf (дата обращения: 04.01.2022).
15. Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Исследование связи солёности и флуоресценции желтого вещества в Карском море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 34–39. doi:10.7868/S2073667318030048
16. O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors — OC4, OC5 and OC6 // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 229. P. 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
17. Giraudeau J., Hulot V., Hanquiez V., Devaux L., Howa H., Garlan T. A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea // Journal of Marine Systems. 2016. Vol. 158. P. 93–105. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.02.012
18. Алексеев В.А., Иванов В.В., Репина И.А., Лаврова О.Ю., Станичный С.В. Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Арго // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 90–104. doi:10.7868/S0205961416010012
19. Мошаров С.А., Мошарова И.В. Динамика потенциальной фотосинтетической активности фитопланктона при изменении освещённости в Северной Атлантике // Вопросы современной альгологии. 2019. № 1(19). С. 35–45. doi:10.33624/2311-0147-2019-1(19)-35-45

References

1. Hunt Jr. G.L., Drinkwater K.F., Arrigo K., Berge J., Daly K.L., Danielson S., Daase M., Hop H., Isla E., Karnovsky N., Laidre K. Advection in polar and sub-polar environments: Impacts on high latitude marine ecosystems. *Progress in Oceanography*. 2016, 149, 40–81. doi: 10.1016/j.pocean.2016.10.004
2. Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Lipinskaya N.A., Moiseeva N.A., Churilova T. Ya., Ponomarev V.I., Aglova E.A., Artemiev V.A., Latushkin A.A., Major A. Yu. Variability of the sea surface bio-optical characteristics in the region of Falkland Current and Patagonian shelf. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021, 18, 6, 200–213 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213

3. Mankovsky V.I., Mankovskaya E.V. Bio-optical characteristics in a large-scale survey area in the northern tropical zone of the Atlantic Ocean and their relationship with water dynamics. *Oceanology*. 2022, 62, 22–29. doi:10.1134/S000143702201009X
4. Wassmann P., Kosobokova K.N., Slagstad D., Drinkwater K.F., Hopcroft R.R., Moore S.E., Ellingsen I., Nelson R.J., Carmack E., Popova E., Berge J. The contiguous domains of Arctic Ocean advection: trails of life and death. *Progress in Oceanography*. 2015, 139, 42–65. doi:10.1016/j.pocean.2015.06.011
5. Randelhoff A., Sundford A. Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing. *Ocean Science*. 2018, 14, 2, 293–300. doi:10.5194/os-14-293-2018
6. Lorenzen C.J. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1966, 13, 2, 223–227. doi:10.1016/0011-7471(66)91102-8
7. Nagornyi I.G., Maior A. Yu., Salyuk P.A., Doroshenkov I.M. A mobile complex for on-line studying water areas and surface atmosphere. *Instruments and Experimental Techniques*. 2014, 1, 68–71. doi: 10.1134/S0020441214010175
8. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. V.62. N3. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
9. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
10. Klyuvitkin A.A., Politova N.V., Novigatsky A.N., Kravchishina M.D. Studies of the European Arctic on Cruise 80 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh. *Oceanology*. 2021, 61, 1, 139–141. doi:10.1134/S0001437021010094
11. Goldin Y.A., Glukhovets D.I., Gureev B.A., Grigoriev A.V., Artemiev V.A. Shipboard flow-through complex for measuring bio-optical and hydrological seawater characteristics. *Oceanology*. 2020, 60, 5, 713–720. doi:10.1134/S0001437020040104
12. Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*. 2002, 4, 1, 55–88.
13. Kholod A.L. Overview of the Copernicus marine environment monitoring service products available for the Arctic region. *Physical Oceanography*. 2017, 2, 25–35.
14. Metzger E.J., Hogan P.J., Shriver J.F. et al. Validation test report for the Global Ocean forecast system 3.5–1/25 degree HYCOM/CICE with Tides. *Naval Research LabS Washington DC Washington United States*. URL: https://www.hycom.org/attachments/366_HYCOM-NCODA_VTR_I_Memo_Report_9148.pdf (date of access: 04.01.2022).
15. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Research of the relationship between salinity and yellow substance fluorescence in the Kara Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 34–39 (in Russian). doi:10.7868/S2073667318030048
16. O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors — OC4, OC5 and OC6. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 229, 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
17. Giraudeau J., Hulot V., Hanquiez V., Devaux L., Howa H., Garlan T. A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea. *Journal of Marine Systems*. 2016, 158, 93–105. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.02.012
18. Alexeev V.A., Ivanov V.V., Repina I.A., Lavrova O. Yu., Stanichny S.V. Convective structures in the Lofoten Basin based on satellite and Argo data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016, 52, 9, 1064–10. doi:10.1134/S0001433816090036
19. Mosharov S.A., Mosharova I.V. Dynamics of the potential photosynthetic activity of marine phytoplankton during illumination change in the North Atlantic. *Issues of Modern Algology*. 2019, 1(19), 35–45 (in Russian). doi:10.33624/2311-0147-2019-1(19)-35-45

Об авторах

АГЛОВА Евгения Андреевна, РИНЦ AuthorID: 1160772, e-mail: aglova.ea@phystech.edu
ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич, РИНЦ AuthorID: 924346, ORCID: 0000-0001-5641-4227,
e-mail: glukhovets@ocean.ru

УДК 551.556.4

© Д. В. Вострякова^{1,2*}, И. А. Капустин^{1,2}, Т. Н. Лазарева¹, О. А. Даниличева^{1,2}, С. А. Ермаков^{1,3}, 2022

¹Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, 46, г. Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, Россия

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

*vostryakova@ipfran.ru

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОЙ ПЛЕНКИ И ТРАНСФОРМАЦИИ ЕЕ ГРАНИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Статья поступила в редакцию 31.01.2022, после доработки 08.04.2022, принята в печать 02.05.2022

Аннотация

Представлены результаты лабораторного эксперимента, посвящённого моделированию механизмов локализации пленки поверхностно-активного веществ под действием периодических поверхностных волн. Было показано, что область пленки, поджатой поверхностной волной, условно делится на три части: плотная пленка на наибольшем удалении от источника волн, область «разреженной» пленки и область относительно чистой поверхности воды. Основное внимание было уделено процессам, происходящим в области «разреженной» пленки — переходной области от чистой воды к плотной поджатой волнами пленке, где регистрировались горизонтальные циркуляционные движения. В зависимости от амплитуды волны наблюдался различный характер течений: дивергентные циркуляционные ячейки при малых и больших амплитудах волн и роликовые течения, образующие зону конвергенции на оси бассейна при средних амплитудах. Сравнение экспериментально полученного стационарного распределения концентрации поверхностно-активных веществ с развитой ранее моделью компрессии пленок поверхностными напряжениями, вызванными волнами, показало удовлетворительное согласие теории и эксперимента при малых и относительно больших амплитудах волн. Выявленное расхождение при средних амплитудах волн в области «разреженной» пленки объясняется наличием циркуляционных ячеек, которые рассматриваемая модель не учитывает.

Ключевые слова: пленки ПАВ, компрессия, индуцированные течения, циркуляционные ячейки, конвергенция, стационарное распределение концентрации пленки

© D. V. Vostryakova^{1,2*}, I. A. Kapustin^{1,2}, T. N. Lazareva¹, O. A. Danilicheva^{1,2}, S. A. Ermakov^{1,3}, 2022

¹Institute of Applied Physics RAS, 603950, Ulyanova Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950, Gagarin Avenue, 23, Nizhny Novgorod, Russia

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

*vostryakova@ipfran.ru

LABORATORY STUDY OF SURFACTANT FILM COMPRESSION AND BOUNDARY TRANSFORMATION UNDER THE ACTION OF SURFACE WAVES

Received 31.01.2022, Revised 08.04.2022, Accepted 02.05.2022

Abstract

In this paper we present the results of a laboratory experiment simulating the mechanisms of a surfactant film localization under the action of periodic surface waves. It is shown that the film compressed by a surface wave, can be conditionally divided into three sections — the dense film region as the most distant from the wave source, the area of a diluted film and the region of relatively clean water. The paper is focused on the processes occurring in the diluted film region characterized by the transition from clean water to the dense film, where horizontal circulation currents are registered. The character of currents is varying depending

Ссылка для цитирования: Вострякова Д.В., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Даниличева О.А., Ермаков С.А. Лабораторное исследование компрессии поверхностно-активной пленки и трансформации ее границы под действием поверхностной волны // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 63–73. doi:10.48612/fpg/xk62-mm5t-flhph
For citation: Vostryakova D.V., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Danilicheva O.A., Ermakov S.A. Laboratory Study of Surfactant Film Compression and Boundary Transformation under the Action of Surface Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 63–73. doi:10.48612/fpg/xk62-mm5t-flhph

on the wave amplitude so that the divergent circulation cells occur at small and large wave amplitudes, but at medium amplitudes the roller currents forming a convergence zone on the basin axis are observed. The experimentally obtained stationary distribution of surfactant concentration is compared with the previously developed model of film compression due to surface tension induced by waves. The comparison shows good agreement between the theory and the experimental results at small and large wave amplitudes. Their discrepancy at medium wave amplitudes in the diluted film region is presumably related to the presence of convergent cells which are not considered in the model.

Keywords: surfactant films, compression, induced flow, circulation cells, convergence, stationary distribution of film concentration

1. Введение

Для уменьшения ущерба, возникшего в результате распространения загрязнений на поверхности океана, представляющих собой разливы нефтепродуктов, сточные воды, бытовые и промышленные отходы, необходимо развитие методов быстрого своевременного реагирования на такие происшествия. В настоящее время методы дистанционного зондирования являются одним из наиболее перспективных инструментов для диагностики поверхности Мирового океана, в частности, для обнаружения загрязнений антропогенного и биогенного происхождения [1]. Такие загрязнения на поверхности воды зачастую маркируются пленкой поверхностно-активного вещества (ПАВ), которая гасит короткие ветровые волны и образует выглаженные области — так называемые слики [2]. Для эффективной организации работ по ликвидации таких загрязнений, в особенности разливов нефтепродуктов, которые представляют значительную угрозу для окружающей среды, необходимы прогнозы распространения и растекания таких пленочных сликов.

Как известно, на геометрию и дрейф сликов на поверхности воды влияет множество факторов и процессов, которые необходимо учитывать при прогнозировании их распространения, и к которым относятся, в частности, приповерхностный ветер, течения [3, 4], поверхностные и внутренние волны [5], температура окружающей среды [6] и пр. Эти факторы влияют на физико-химические процессы (растекание, испарение, растворение, эмульгирование) в пленке и, как результат, на ее характеристики (вязкость, плотность, поверхностное натяжение и т.д.) [7]. Поскольку одновременный учет всех факторов при моделировании распространения пленочного пятна затруднителен, то в известных моделях разливов нефти [8] чаще всего рассматриваются воздействия на слик течений, волн, ветра. При этом базовой моделью при описании процесса растекания является модель Фэя [9, 10] или ее аналоги, которые описывают осесимметричное растекание плёнки на спокойной не взволнованной поверхности воды. Влияние же волнения на слик обычно учитывается только при расчёте его дрейфа как целого (см. [8] и цитируемую там литературу). Отличие модели, представленной в работах [11, 12] от моделей, рассмотренных в [8], заключается в учете влияния ветрового волнения на процессы растекания сликовых пятен. За счет затухания коротких ветровых волн в области плёнки возникают дополнительные поверхностные напряжения, которые замедляют растекание разлива в поперечном относительно ветра направлении и увеличивают скорость растекания в продольном направлении [12]. Учитывая сложности проведения натурных исследований динамики пленок, важную роль играет контролируемый лабораторный эксперимент. Подчеркнем, однако, что к настоящему времени проверка предложенной модели в лабораторных условиях отсутствует.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных экспериментов, моделирующих процесс компрессии пленки ПАВ под действием поверхностных волн, индуцирующих средние течения, включающие в себя стоков дрейф и дрейф из-за вязкого затухания волн. Проведено сравнение результатов лабораторного эксперимента с выводами модели компрессии поверхностных пленок для наиболее простого случая поверхностных квазимонохроматических волн [11–13], т.е. в отсутствие непосредственного воздействия ветра на пленку и на волнение.

2. Эксперимент

Лабораторные эксперименты проводились в овальном ветроволновом бассейне ИПФ РАН с двумя прямыми секциями, одна из которых, с геометрическими размерами 2 м в длину и по 30 см в широту и в глубину, являлась рабочей областью. Схема установки и вид сверху на рабочую секцию бассейна показаны на рис. 1.

По краям рабочей области устанавливались две наклонные плоскости, которые служили для локализации пленки и одновременно являлись волногасителями (коэффициент отражения волн не более 0,07). Источником поверхностных волн служил механический волнопродуктор, с помощью которого осуществлялась генерация волн частотой 4 Гц, амплитуды которых регистрировались струнным волнографом. Для создания пленок ПАВ использовались спиртовые растворы олеиновой кислоты (OLE), наносившиеся с помощью капельницы на поверхность воды. Эксперименты проводились вначале на чистой поверхности,

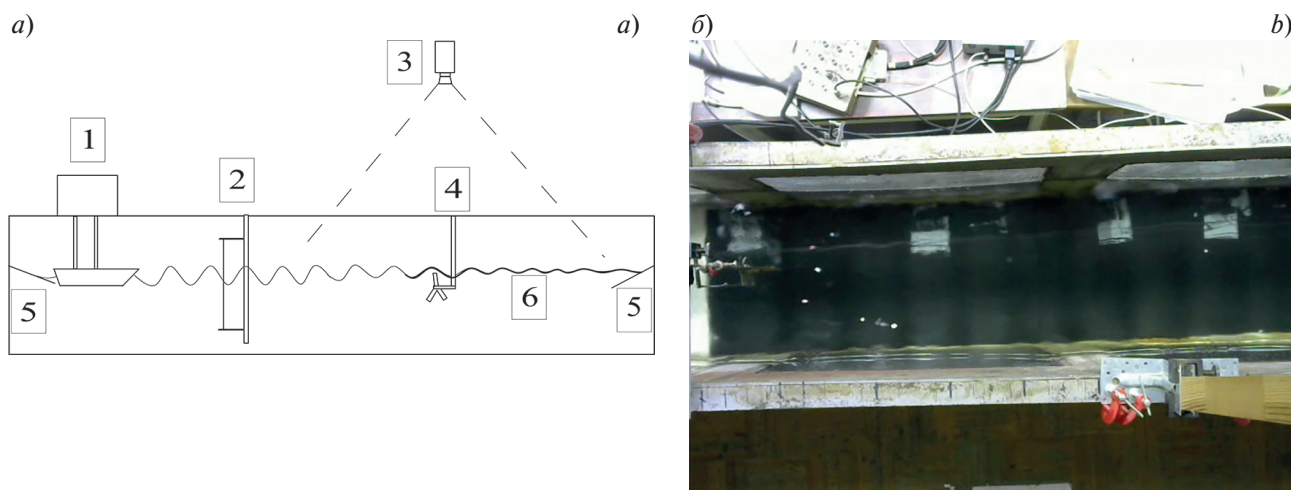


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Вид сбоку: 1 — волнопродуктор, 2 — волнограф, 3 — видеокамера, 4 — ADV, 5 — волногаситель, 6 — пленка OLE (а). Фотография — вид на бассейн сверху (б)

Fig. 1. Experimental setup. Side view: 1 — wave maker, 2 — wave recorder, 3 — video camera, 4 — ADV, 5 — wave damper, 6 — OLE film (a). Photo — view of the pool from above (b)

а затем на поверхности воды, покрытой пленкой OLE с концентрацией $0,51 \text{ мг/м}^2$. Для измерения направления и скорости течений вблизи границы пленки использовался акустический доплеровский измеритель скорости (ADV SonTek 16 MHz) [14], размещаемый на глубине 2 см от поверхности воды. Датчик перемещался в поперечном направлении бассейна от одной его стенки к другой. В результате усреднения данных ADV строились зависимости скоростей от местоположения датчика в поперечном сечении бассейна.

Генерируемые поверхностные волны приводили к дрейфу пленки в направлении распространения волн и ее сжатию. В результате около волнопродуктора образовывалась очищенная от пленки область, а с противоположной стороны у волногасителя происходило концентрирование ПАВ. На поверхность воды наносились частицы, маркирующие поверхностный дрейф (цветные бумажные частицы размером 5 мм и частицы талька). Процессы сжатия пленки ПАВ и движение маркеров непрерывно регистрировались установленной над бассейном видеокамерой (см. фото на рис. 1, б), на рис. 2 представлены два характерных варианта распределения талька под действием индуцированных волнами течений при различных амплитудах волн и в разные моменты времени. Обработка видеозаписей включала в себя оцифровку траектории движения маркеров и распределения талька в программе Surfer 7.0 (13.0.383).

Вторая часть эксперимента состояла в исследовании квазистационарного распределения концентрации пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне. Для этого с поверхности воды, покрытой поджатой волнами пленкой, одновременно отбиралось 5 сеточных проб [2]. Далее взятые сетками образцы ПАВ смывались специально очищенным этиловым спиртом, и характеристики пленки ПАВ исследовались с помощью метода параметрически возбуждаемых волн [2]. В ходе этих исследований измерялись длины стоячих гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), параметрически возбуждаемых на поверхности воды в вертикально осциллирующей кювете — «ряби Фарадея». С использованием дисперсионного соотношения для ГКВ восстанавливались значения коэффициента поверхностного натяжения (КПН). Измерения производились для трёх значений амплитуды волн: $A = 0,17 \text{ см}$, $A = 0,35 \text{ см}$, $A = 0,42 \text{ см}$. На каждую амплитуду приходилось по две серии экспериментов с пробами. В ходе дальнейшей обработки строились зависимости КПН от расстояния от границы поджатой пленки, определяемой по замедлению маркеров.

3. Результаты экспериментов

3.1. Стационарное распределение пленки ПАВ

Результаты обработки видеозаписей — траектории бумажных маркеров, цветовые поля продольной компоненты скорости дрейфа, границы пленки (красная линия) при различных амплитудах волны частотой 4 Гц — представлены на рис. 3. Местоположение красной линии (тальк) соответствует области, в которой резко уменьшалась скорость дрейфа, отвечая границе области значительного цветового контраста на рис. 3.

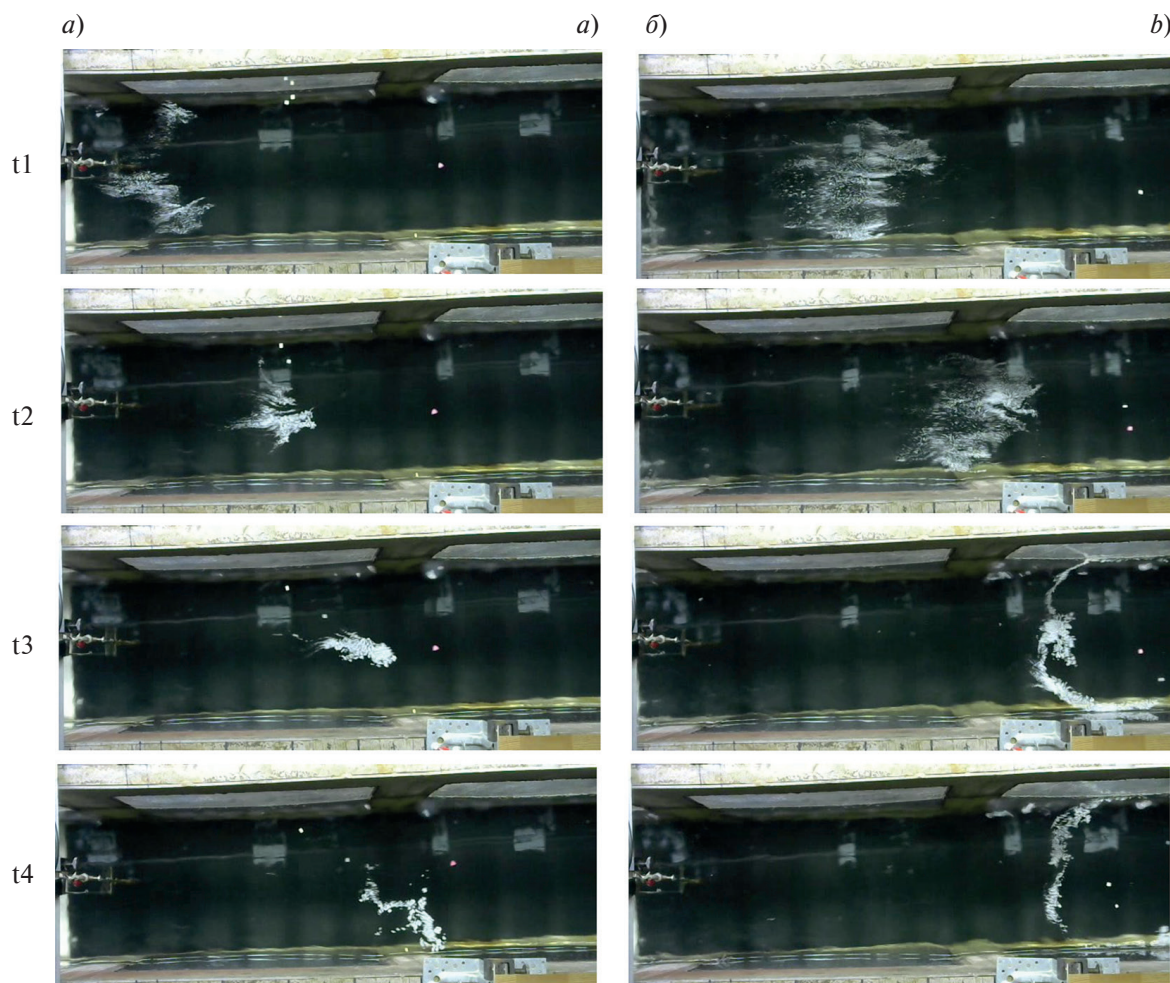


Рис. 2. Перераспределения талька волнами различных амплитуд: $A = 3,0$ мм (а), $A = 4,5$ мм (б).

Fig. 2. The talc redistribution due to the surface waves of different amplitudes: $A = 3.0$ mm (a), $A = 4.5$ mm (b)

Как видно из рис. 3, рабочую область можно условно разделить на три части. Вблизи волнопродуктора из-за сноса большей части пленки индуцированным дрейфом формируется зона практически чистой воды, где маркеры движутся относительно быстро и прямолинейно. Скорости в этой области порядка скорости суммарного дрейфа (стоксова дрейфа и дрейфа из-за вязкого затухания волн), характерные значения приведены в таблице 1. У волногасителя с противоположной стороны от волнопродуктора формируется «плотная» пленка, здесь имеет место сильное гашение поверхностных волн. При переходе от чистой поверхности к «плотной пленке» формируется переходная область «разреженной пленки», в которой наблюдается уменьшение скорости дрейфа и амплитуды волн по сравнению с чистой поверхностью, кроме того, в этой области присутствуют сложные вихревые движения маркеров. Так формируется квазистационарное распределение пленки в поле волнового дрейфа.

В ходе множества экспериментов при генерации поверхностных волн было замечено, что в бассейне могут возникать случайные неконтролируемые течения, природа которых до конца не ясна. Такие течения приводят к неоднородности пленки в рабочей области бассейна. В некоторых случаях при малых, реже при средних амплитудах происходили разрывы пленки, при этом попавшие в эту область частицы ускорялись (например, рис. 3, а–б). Прохождение частиц в разрывы пленки учитывалось как часть ошибки при определении границы пленки (ее изрезанности) и ввиду относительной редкости события разрыва эта ошибка была незначительной.

В результате обработки поверхностных проб было исследовано стационарное распределение пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне при различных амплитудах волн. Зависимости КПН поверхности от расстояния от границы пленки представлены на рис. 4. Ошибка определения границы пленки, возникающая вследствие ее изрезанности, не превышает 11 %, ошибка определения КПН составила менее 15 %.

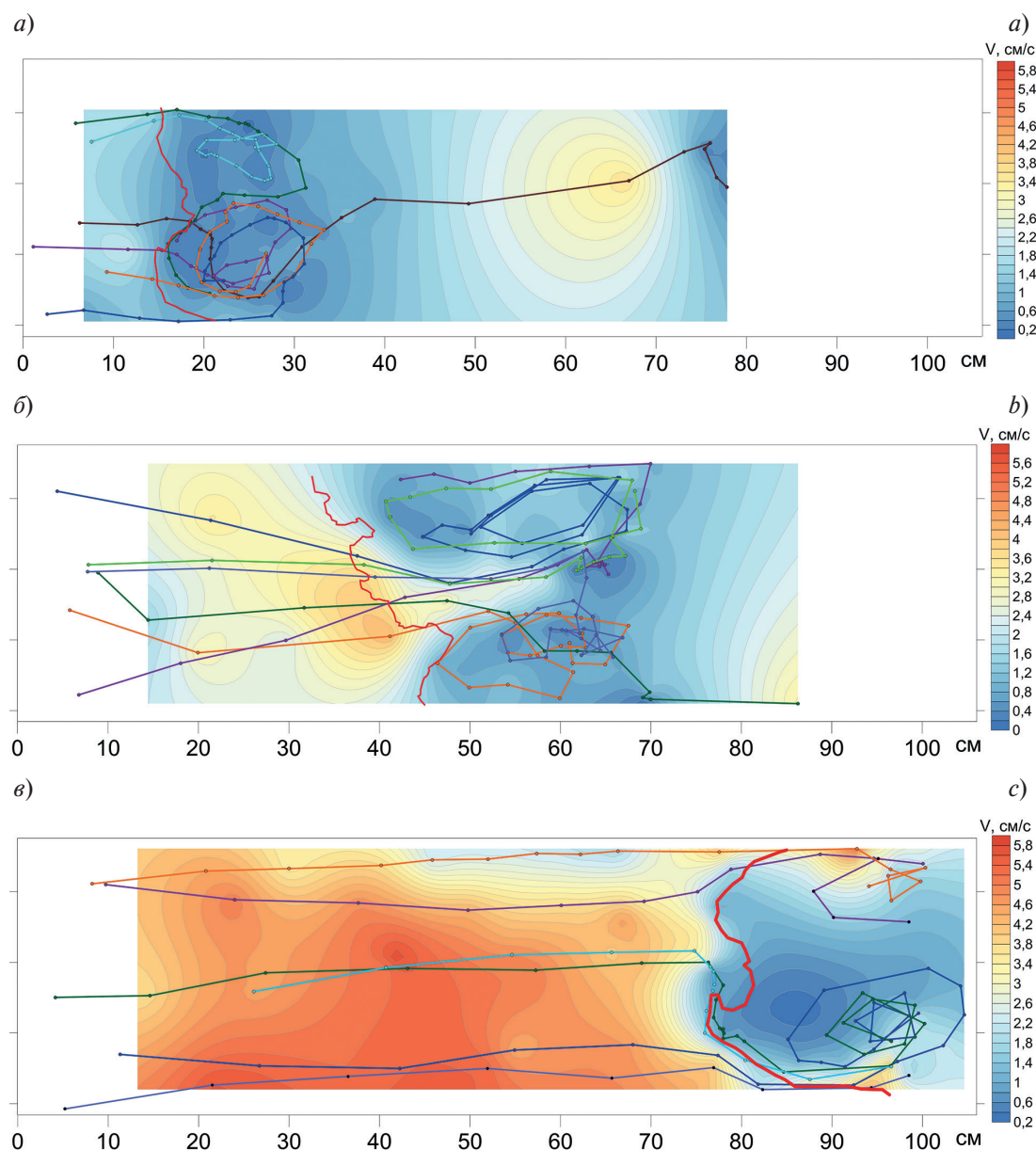


Рис. 3. Примеры траекторий маркеров, пространственное распределение продольных скоростей, границы пленки для волны 4 Гц, концентрации пленки $0,51 \text{ мг/м}^2$ для трех значений амплитуды волны: $A = 0,23 \text{ см}$ (а), $A = 0,3 \text{ см}$ (б), $A = 0,45 \text{ см}$ (в)

Fig. 3. Examples of particle trajectories, longitudinal velocity color fields, film edge for a 4 Hz wave. The film concentration is 0.51 mg/m^2 . Wave amplitudes: $A=0.23 \text{ cm}$ (a), $A=0.3 \text{ cm}$ (b), $A=0.45 \text{ cm}$ (c)

Таблица 1

Table 1

Значения скоростей дрейфа для амплитуд, представленных на рис. 3

The drift velocities for the amplitudes shown in Fig. 3

A, см	$V_{\text{эксп}}, \text{ см/с}$	$V_{\text{теор}}, \text{ см/с}$
а) 0,23	1–1,4	1,2
б) 0,3	2,2–2,6	1,9
в) 0,45	4,2–5	4,4

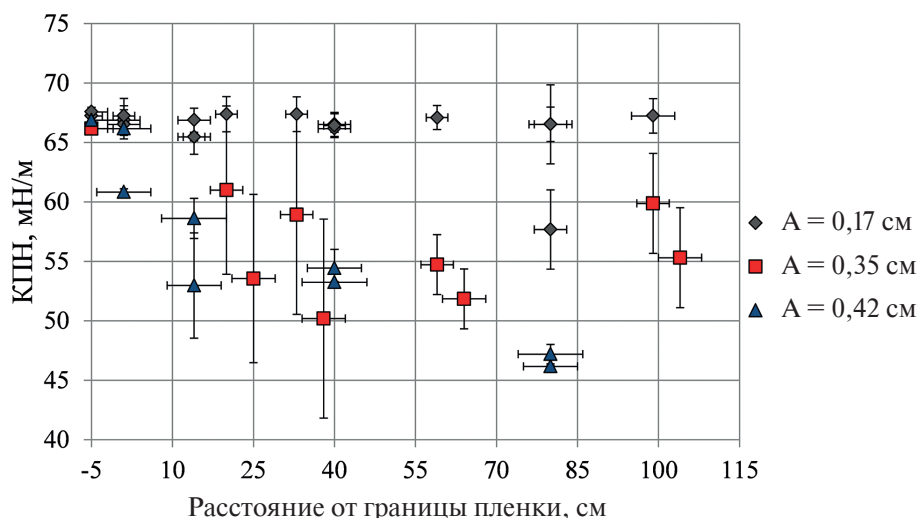


Рис. 4. Экспериментальные значения КПН в зависимости от расстояния от границы пленки. Частота волны 4 Гц, амплитуды: $A = 0,17$ см (ромбы), $A = 0,35$ см (квадраты), $A = 0,42$ см (треугольники)

Fig. 4. Experimental values of the surface tension coefficient as a function of the distance from the film edge. The wave frequency is 4 Hz, amplitudes: $A = 0.17$ cm (rhombus), $A = 0.35$ cm (square), $A = 0.42$ cm (triangle)

На рис. 4 условной границе пленки отвечает расстояние 0 см. По мере распространения волн в область пленки наблюдается уменьшение КПН, что соответствует росту концентрации ПАВ за счет поджатия волнами. Следует отметить, что при малой амплитуде волн область, покрытая ПАВ, занимала практически все рабочее пространство бассейна, концентрация пленки была не велика и измеренные значения КПН были близки между собой независимо от расстояния от волнопродуктора, что, видимо, способствовало образованию разрывов пленки.

3.2. Приповерхностные циркуляционные течения в переходной области

По распределению талька (рис. 2) были определены два основных сценария поведения маркеров под действием волн разной амплитуды. При малой и большой амплитудах в условиях эксперимента тальк движется достаточно равномерно (рис. 2, б). На границе пленки основная масса талька перемещается от центра бассейна к стенкам, что может свидетельствовать о возникновении разнонаправленных циркуляционных ячеек, создающих по центру бассейна зону дивергенции. Движение талька при генерации волн средней амплитуды в условиях лабораторного эксперимента существенно отличается от описанного выше случая. Как видно из рис. 2, а, тальк преимущественно скапливается в центре бассейна, что может говорить о наличии зоны конвергенции.

Для аналогичной характеристики движения маркеров используем понятие коэффициента компрессии (K), равного отношению поперечного расстояния, на котором частицы располагались в начале своего движения вблизи волнопродуктора, к расстоянию, на котором они оказываются вблизи границы пленки (на рис. 3 расстояние между первыми точками крайних траекторий и между точками около красной линии — границы пленки соответственно). Как видно из рис. 5, коэффициент K имеет максимум при средних амплитудах волн, что свидетельствует о наличии области конвергенции при средних амплитудах волн, где собираются пленка, тальк и маркеры.

На рис. 6 представлены зависимости величин и направлений для двух проекций (вертикальной V_z и горизонтальной V_y) скоростей от положения датчика ADV в поперечном сечении бассейна на глубине 2 см. Направление продольной скорости в ходе эксперимента не менялось.

Полученные с помощью ADV направления скоростей (черные стрелки, рис. 6) демонстрируют наличие зоны дивергенции для больших и малых амплитуд волн, а для средних — зоны конвергенции, подтверждая представленные выше рассуждения о структуре течений в вертикальном разрезе. Схематичная интерпретация данных ADV изображена на рис. 7 на поперечном разрезе бассейна вблизи границы пленки, где светло-серой полосой обозначена линия, вдоль которой выстроился тальк, стрелками на ней обозначено направление, куда под действием циркуляционных ячеек дрейфует тальк.

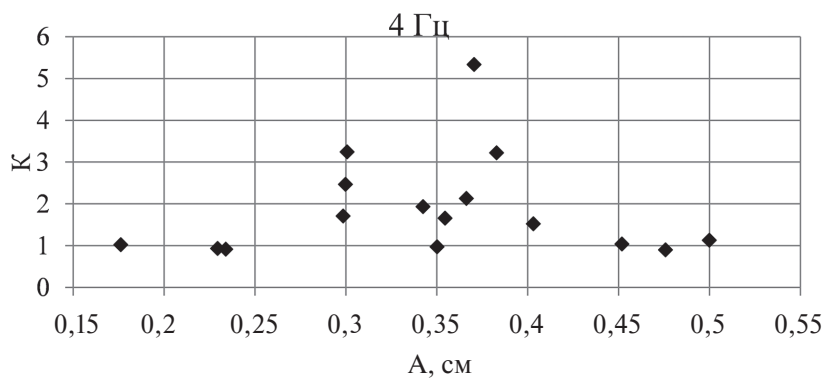


Рис. 5. Зависимость коэффициента компрессии от амплитуды волны

Fig. 5. The compression coefficient dependence on the wave amplitude

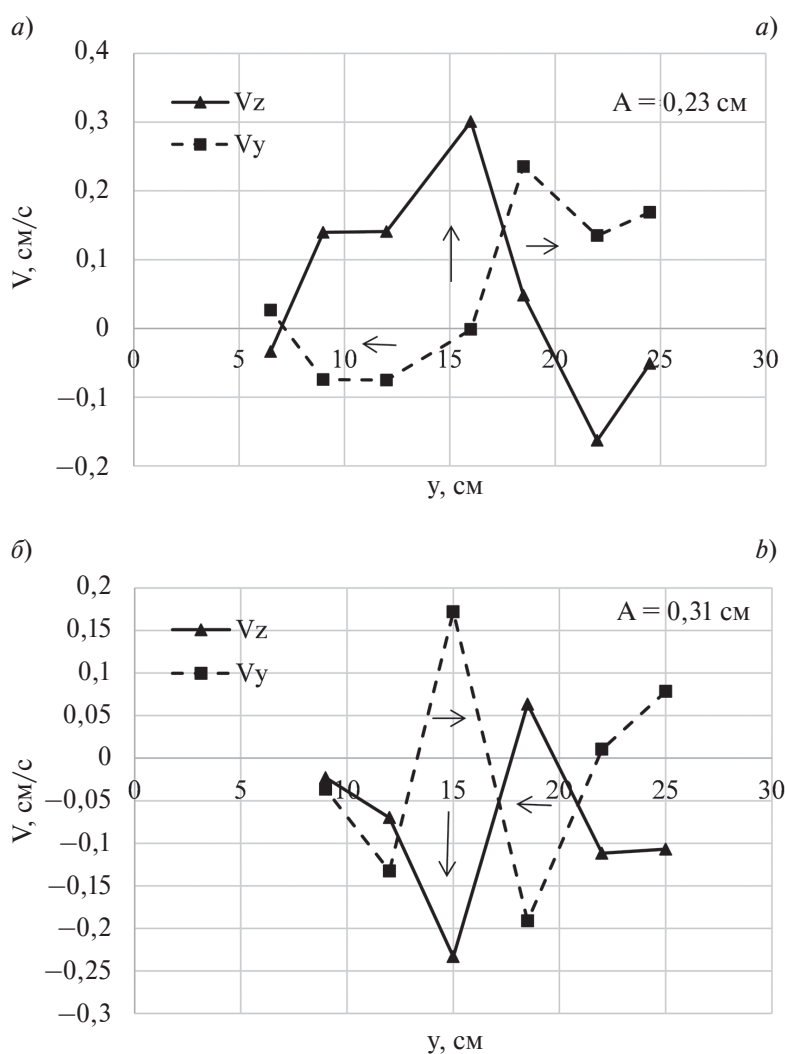


Рис. 6. Зависимости величины и направления двух проекций скоростей течения от поперечного расстояния до края бассейна у границы плёнки. Область дивергенции $A = 0,23$ см (а), конвергенции $A = 0,31$ см (б)

Fig. 6. The dependences of magnitude and direction of two projections of current velocities on the transverse distance from the edge of the basin at the film boundary. Divergence area $A = 0.23$ cm (a), convergence area $A = 0.31$ cm (b)

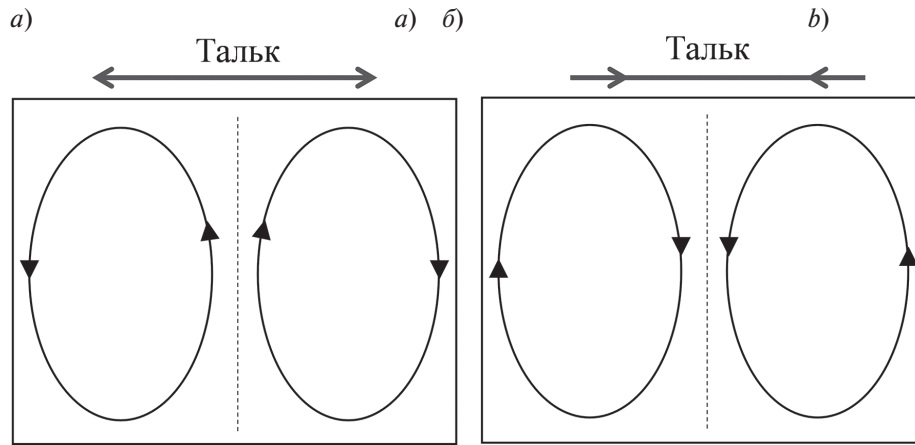


Рис. 7. Схемы циркуляционных ячеек при генерации волн малой и большой амплитуды (а), средней амплитуды (б)

Fig. 7. Schemes of circulation cells in the generation of waves of small and large amplitude (a), medium amplitude (b)

Такие течения, перпендикулярные направлению распространения поверхностных волн и приводящие к изрезанности границ пленки из-за чередования зон конвергенции и дивергенции, наблюдаются в натурных условиях с наветренной стороны сликов [15]. Известно также, что при изменениях скорости ветра и амплитуды поверхностных волн масштаб и характер изрезанности наветренной границы слика может меняться. Изрезанность границ сликов объясняют циркуляциями Ленгмюра, однако связь между амплитудой волн и возникающими областями дивергенции и конвергенции к настоящему времени остается мало изученной [15]. Представленный лабораторный эксперимент позволяет смоделировать указанный эффект пока только на качественном уровне. При этом влияние боковых стенок сказывается на количественных характеристиках течений в толще воды, однако на качественном уровне боковые стенки на полученные результаты не влияют.

4. Сравнение данных эксперимента с моделью

Исходя из баланса сил, влияющих на динамику пленки, согласно [11, 12], условием стационарности ограниченной в пространстве пленки является равенство дополнительных напряжений, индуцированных набегающими в область пленки волнами, и сил поверхностного натяжения (градиент коэффициента поверхностного натяжения). Градиент КПН возникает как результат изменения концентрации ПАВ в области действия индуцированных напряжений. Индуцированные напряжения, в свою очередь, зависят от характеристик пленки — КПН, упругости пленки, а также амплитуды затухающей волны с коэффициентом затухания, который также определяется параметрами пленки, и в конечном итоге распределением концентрации ПАВ. Такой самосогласованный режим формирования локализованной в пространстве пленки можно описать исходя из следующего уравнения:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} - \alpha \bar{\tau}_i(\sigma, E(\sigma), x, \dots) = 0, \quad (1)$$

где σ — КПН,

$$\bar{\tau}_i = \frac{\mu \omega k_0 |A|^2 \exp(-2\kappa x)}{\delta} \frac{\beta_0^2}{|\beta - 1 + i|^2} \left[\frac{1}{\beta_0^2} - 2 \left(\frac{\kappa}{k_0} + k_0 \delta \right) \frac{1}{\beta_0} + 4 k_0 \delta \right] \equiv T_0 |A|^2 \exp(-2\kappa x) \quad (2)$$

— напряжение, индуцированное волной частотой ω и волновым числом k_0 , $\beta = \frac{2\mu\omega}{Ek^2\delta}$, $k = k_0 + i\kappa$, κ —

коэффициент затухания волны в пространстве, $\delta = \sqrt{2\mu / \omega \rho}$ — толщина вязкого пограничного слоя в волне, μ — динамическая вязкость, ρ — плотность воды, A — амплитуда волны, E — упругость пленки, $\alpha = 0,35$ — эмпирический коэффициент.

Выражение для давления пленки, т. е. разницы между КПН для чистой воды и для пленки, в явном виде можно записать следующим образом:

$$\sigma_0 - \sigma = \alpha \frac{T_0 A^2}{2\kappa} (1 - \exp(-2\kappa x)). \quad (3)$$

Здесь σ_0 — КПН воды в отсутствие пленки. Для расчета теоретических зависимостей разницы КПН при $A = 0,17, 0,35$ и $0,42$ см использовались следующие значения параметров: $f = 4$ Гц, $E = 20$ мН/м (согласно [2]).

Теоретическая зависимость давления от расстояния от края пленки и сравнение с экспериментальными данными представлены на рис. 8. Линиями обозначены зависимости распределений давления пленки для трех амплитуд в зависимости от расстояния от границы пленки, рассчитанные в рамках описанной модели. Экспериментальные данные обозначены точками (треугольник — $0,42$ см, квадрат — $0,35$ см, ромб — $0,17$ см).

Как видно из рис. 8, модель удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для малых ($0,17$ см) и больших ($0,42$ см) амплитуд волн, но экспериментальное значение разности КПН в разреженной пленке (квадраты) при амплитуде $0,35$ см значительно выше теоретических оценок (сплошная линия). Причину расхождения при средних амплитудах можно объяснить тем, что модель не учитывает возникающие циркуляционные течения, находящиеся вблизи границы пленки и в области «разреженной» пленки. Пробы для амплитуды $0,35$ см отбирались в области, где за счет поджима пленки соседними циркуляционными ячейками образовалась область скопления пленки. Проба, которая отбиралась в области «плотной» пленки, где уже отсутствуют вихревые течения, согласуется с моделью (квадраты на расстояние около 1 м).

5. Выводы

Проведено исследование эффекта компрессии пленок поверхностно-активных веществ дрейфовыми течениями, индуцированными поверхностными волнами. Стационарное распределение пленки в поле волнового дрейфа формируется следующим образом: чистая поверхность — «разреженная» пленка — плотная пленка. Область «разреженной» пленки характеризуется наличием циркуляционных течений, меняющих свои характеристики в зависимости от амплитуды волны. Так, течения при малых и больших амплитудах, для условий эксперимента, характеризуется как дивергентное, в то время как при средних значениях амплитуд наблюдается максимальная поперечная компрессия, связанная с развитием роликовых течений в толще воды.

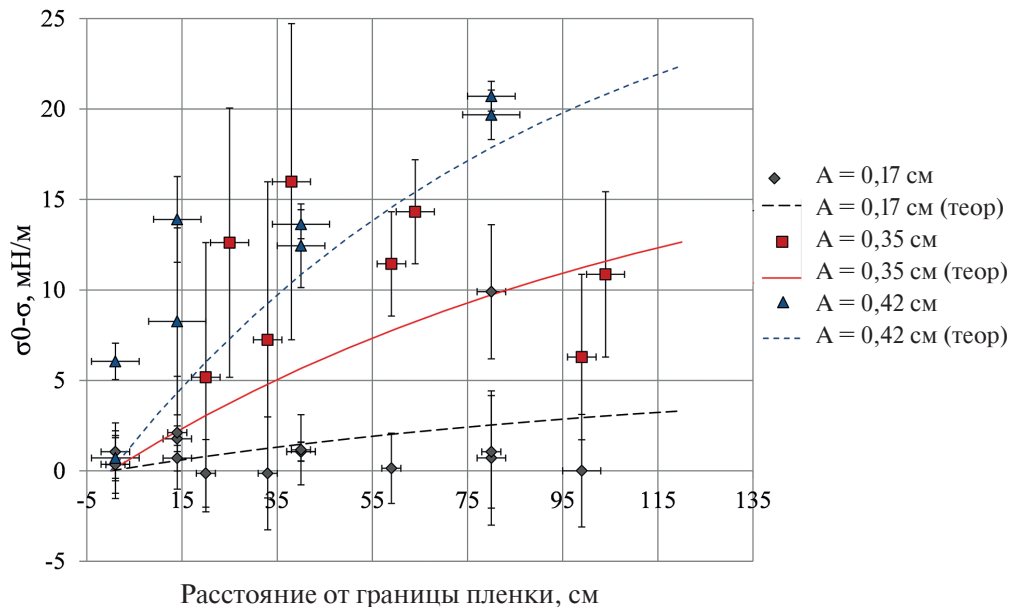


Рис. 8. Теоретические и экспериментальные зависимости давления пленки от расстояния от края пленки

Fig. 8. Theoretical and experimental dependencies of film pressure on distance from the film edge

Проведено сравнение экспериментальных данных, полученных в результате отбора проб с выводами модели компрессии поверхностных пленок в поле поверхностных волн. При малых и больших амплитудах значения давления пленки, рассчитанные в рамках модели, хорошо согласуются с данными лабораторного эксперимента. Расхождение при средних амплитудах волн объясняется наличием конвергентных роликовых течений в области «разреженной» пленки, которые модель не учитывает.

Проведенные лабораторные эксперименты качественно моделируют эффект образования гребенчатых структур на границах slickов с их наветренной стороны. Однако связь параметров изрезанности границы пленки в зависимости от характеристик поверхностных волн пока исследованы недостаточно полно. В дальнейшем планируется продолжение лабораторных экспериментов по изучению компрессии пленки под действием напряжений от поверхностных ветровых волн, включающее в себя верификацию модели с учетом нескольких спектральных компонент волнения.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-77-10066, <https://rscf.ru/project/18-77-10066/>.

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 18-77-10066, <https://rscf.ru/project/18-77-10066/>.

Литература

1. Лаврова О.Ю., Мутягина М.И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
2. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
3. Капустин И.А., Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Мольков А.А. Об оценке вклада приводного ветра в кинематику slickов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 2. С. 163–172. doi:0.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172
4. Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field study of film spreading on a sea surface // Oceanologia. 2014. V. 56, N 3. P. 461–475. doi:10.5697/oc.56–3.461
5. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A. Strong modulation of short wind waves and ka-band radar return due to internal waves in the presence of surface films. Theory and experiment // Remote Sensing. 2021. V. 13, N 13. P. 2462. doi:10.3390/rs13132462
6. Сергиевская И.А., Лазарева Т.Н. Влияние температуры окружающей среды на вязкоупругие свойства нефтяных плёнок в приложении к проблеме дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 2. С. 176–183. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-2-176-183
7. Бескид П.П., Дурягина Е.Г. Характеристика процессов трансформации нефти в морской среде и их влияние на операции по ликвидации аварийных разливов нефти // Эксплуатация морского транспорта. 2011. Т. 1, № 63. С. 71–75.
8. Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9, N 2. P. 181. doi:10.3390/jmse9020181
9. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // Oil on the Sea. Ocean Technology. ed. Hoult D.P. Boston: Springer, 1969. P. 53–63.
10. Монин А.С., Красицкий В.П. Phenomena on the surface of the ocean. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
11. Ermakov S.A., Danilicheva O.A., Kapustin I.A., Leschev G.V., Molkov A.A. Deformation of film slicks on the water surface. Experiment and model // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2020. V. 17, N 6. P. 97–102.
12. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J. Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms // Proc. SPIE9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. P. 963807.
13. Ермаков С.А., Ермошкин А.В., Капустин И.А. Об эффекте сжатия пленочного слика // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 288–294. doi:10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294

14. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Web: <https://www.xylen-analytics.asia/productsdetail.php?> SonTek-16-MHz-MicroADV-71 (дата обращения: 14.11.2021).
15. Ермаков С.А., Лаврова О.Ю., Капустин И.А., Ермошкин А.Б., Мольков А.А., Даниличева О.А. О гребенчатой структуре границ slickов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 208–217. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217

References

1. Lavrova O. Yu., Mityagina M.I. Satellite monitoring of film pollution on the surface of the Black Sea. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2012, 3, 48–65 (in Russian).
2. Ermakov S.A. Influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves *N. Novgorod: IPF RAN*, 2010. 164 p. (in Russian).
3. Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Mol'kov A.A. On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019, 16, 2, 163–172 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172
4. Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field study of film spreading on a sea surface. *Oceanologia*. 2014, 56, 3, 461–475. doi:10.5697/oc.56-3.461
5. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A. Strong modulation of short wind waves and ka-band radar return due to internal waves in the presence of surface films. Theory and experiment. *Remote Sensing*. 2021, 13, 13, 2462. doi:10.3390/rs13132462
6. Sergievskaya I.A., Lazareva T.N. The influence of water temperature on viscoelastic properties of oil films in application to remote sensing. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020, 17, 2, 176–183 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2020-17-2-176-183
7. Beskid P.P., Duryagina E.G. The characteristic of processes of transformation of oil in the sea environment and their influence on operations on liquidation of emergency spills. *E'kspluatatsiya Morskogo Transporta*. 2011, 1, 63, 71–75 (in Russian).
8. Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9, 2, 181. doi:10.3390/jmse9020181
9. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. *Oil on the Sea. Ocean Technology*. ed. Hoult D.P. Boston: Springer, 1969, 53–63.
10. Monin A.S., Krasickij V.P. Phenomena on the surface of the ocean. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1985, 376 p. (in Russian).
11. Ermakov S.A., Danilicheva O.A., Kapustin I.A., Leschev G.V., Molkov A.A. Deformation of film slicks on the water surface. Experiment and model. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020, 17, 6, 97–102.
12. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J. Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms. *Proc. SPIE9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2015, 963807.
13. Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A. On the effect of film slick compression. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2017, 14, 3, 288–294 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294
14. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Web: <https://www.xylen-analytics.asia/productsdetail.php?> SonTek-16-MHz-MicroADV-71 (date of access: 14.11.2021).
15. Ermakov S.A., Lavrova O. Yu., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Molkov A.A., Danilicheva O.A. On the “comb” structure of the edges of slicks on the sea surface. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018, 15, 7, 208–217 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217

Об авторах

ВОСТРЯКОВА Дарья Васильевна, РИНЦ AuthorID: 1135381, ORCID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981–2022, e-mail: vostryakova@ipfran.ru
КАПУСТИН Иван Александрович, РИНЦ AuthorID: 565925, ORCID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593–2014, e-mail: kia@ipfran.ru
ЛАЗАРЕВА Татьяна Николаевна, РИНЦ AuthorID: 811564, ORCID: 0000-0002-0674-4831, Scopus AuthorID: 54884797800, WoS ResearcherID: AAJ-4607–2021, e-mail: lazareva@ipfran.ru
ДАНИЛИЧЕВА Ольга Аркадьевна, РИНЦ AuthorID: 1064727, ORCID: 0000-0001-9529-2517, Scopus AuthorID: 57204632237, WoS ResearcherID: AAG-7486–2020, e-mail: olgadan@ipfran.ru
ЕРМАКОВ Станислав Александрович, РИНЦ AuthorID: 32579, ORCID: 0000-0002-0869-4954, Scopus AuthorID: 7006796194, WoS ResearcherID: L-6157–2017, e-mail: stas.ermakov@ipfran.ru

УДК 681.883.77

© А. Д. Консон, А. А. Волкова*, 2022

АО «Концерн «Океанприбор», Чкаловский пр., д. 46., Санкт-Петербург, 197376, Россия

*wolkova.aa@yandex.ru

МОДУЛЯЦИЯ ШУМОВОГО СИГНАЛА ПРИ КАЧКЕ КОРАБЛЯ ВСЛЕДСТВИЕ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЛУЧЕЙ

Статья поступила в редакцию 03.09.2021, после доработки 27.10.2022, принята в печать 18.11.2022

Аннотация

Амплитудная модуляция шумового сигнала надводного корабля образуется как непосредственно в процессе шумоизлучения при вращении линии вала и винта, так и дополнительно — вследствие качки корабля, обусловленной волнением моря. При этом дополнительную низкочастотную (не более 0,2 Гц) амплитудную модуляцию шумоизлучения можно наблюдать в виде процесса временных вариаций мощности принимаемого сигнала. В связи с этим, представляет интерес установить связь спектра амплитудно-фазовой модуляции широкополосного сигнала корабля при его качке со спектром процесса качки.

В качестве механизма образования модуляции шумового сигнала при качке корабля рассмотрено явление флуктуирующей интерференции лучей, распространяющихся от вертикально качающегося точечного подводного источника вблизи поверхности воды. Получены аналитические соотношения, связывающие спектр амплитудно-фазовой модуляции широкополосного сигнала корабля при его качке со спектром процесса качки. В результате установлен параметр, описывающий совокупные условия, по которому можно определить спектральные свойства модуляции. Вид спектра вариации мощности может быть различным существенно в зависимости от значений параметра $K = 2k\sigma_H \sin \alpha$, где k — волновое число, σ_H — среднеквадратичное значение вертикальной составляющей (смещения источника) вследствие качки, α — угол скольжения луча у поверхности. При значении $K < 1$ результаты наблюдения процесса модуляции сигнала можно отождествлять с процессом качки корабля. При значении $K > 1$ спектр модуляции сигнала не будет соответствовать спектру процесса качки. С ростом значения параметра K спектр модуляции расширяется, выходит за пределы спектра процесса качки. Появляются существенно более низкие и высокие гармоники. Результаты компьютерного моделирования и натурных экспериментов подтвердили зависимость вида спектра модуляции от параметра K . Таким образом, установлено наличие дополнительного механизма образования модуляции шумового сигнала при качке корабля, обусловленного явлением флуктуирующей интерференции лучей, распространяющихся от вертикально качающегося точечного подводного источника вблизи поверхности воды.

Ключевые слова: гидроакустика, шумопеленгование, качка, модуляция, флуктуация, спектр

© А. Д. Консон, А. А. Волкова*, 2022

JSC "Concern "Oceanpribor", Chkalovsky pr., 46, St. Petersburg, 197376, Russia

*wolkova.aa@yandex.ru

NOISE SIGNAL MODULATION AT THE SHIP ROLLING AND PITCHING DUE TO FLUCTUATING INTERFERENCE OF BEAMS

Received 03.09.2021, Revised 27.10.2022, Accepted 18.11.2022

Abstract

Amplitude modulation of a noise signal of the surface ship is formed both directly at noise emission, when the line of the shaft and the propeller is rotating, and in addition due to the ship rolling and pitching caused by the rough sea. At the same time additional low-frequency (no more than 0,2 Hz) amplitude modulation of the noise emission can be observed as a process of temporary variations of the received signal power. In this regard, it is interesting to find relation of the amplitude-phase modulation spectrum of the ship broadband signal at its rolling and pitching with the spectrum of rolling and pitching process.

Ссылка для цитирования: Консон А.Д., Волкова А.А. Модуляция шумового сигнала при качке корабля вследствие флуктуирующей интерференции лучей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 74–81. doi:10.48612/fpg/xgkz-naer-b78u

For citation: Konson A.D., Volkova A.A. Noise Signal Modulation at the Ship Rolling and Pitching due to Fluctuating Interference of Beams. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 74–81. doi:10.48612/fpg/xgkz-naer-b78u

As a mechanism of formation of the noise signal modulation at the ship rolling and pitching the fluctuating interference of the beams, propagating from vertically dipping underwater point source near the water surface, is considered. The analytical ratios connecting the amplitude-phase modulation spectrum of the ship broadband signal at its rolling and pitching with the spectrum of rolling and pitching process are received. As a result, the parameter describing cumulative conditions by which it is possible to determine spectral properties of modulation is determined. The type of the power variation spectrum can be substantially different depending on values of parameter $K = 2k\sigma_H \sin\alpha \leq 1$ where k — the wave number, σ_H — root mean square value of the vertical component (source shift) due to rolling and pitching, α — the beam grazing angle at the surface. At value $2k\sigma_H \sin\alpha < 1$ results of observation of the signal modulation process can be identified with process of the ship rolling and pitching. At value $2k\sigma_H \sin\alpha > 1$ the signal modulation spectrum will not correspond to the spectrum of rolling and pitching process. With the increase of parameter K value the modulation spectrum extends, goes beyond the spectrum of rolling and pitching process. Significantly lower and high harmonics emerge. Results of computer modeling and natural experiments confirmed dependence of the type of the modulation spectrum on parameter K . Thus, presence of the additional mechanism of noise signal modulation formation at the ship rolling and pitching, caused by the phenomenon of fluctuating interference of the beams propagating from vertically dipping underwater point source near the water surface is found.

Keywords: hydroacoustics, passive listening, rolling and pitching, modulation, fluctuation, spectrum

1. Введение

Амплитудная модуляция шумового сигнала надводного корабля образуется как непосредственно в процессе шумоизлучения при вращении линии вала и винта, так и дополнительно — вследствие качки корабля, обусловленной волнением моря. При этом дополнительную амплитудную модуляцию шумоизлучения можно наблюдать в виде процесса периодического изменения мощности принимаемого сигнала [1–3].

Различают бортовую, килевую и вертикальную качку. При бортовой качке колебания совершаются вокруг продольной оси корабля, при килевой — вокруг поперечной. Вертикальная качка вызывается изменением сил поддержания при прохождении волны под кораблем [4, 5]. Поскольку основным источником шумового сигнала является винт корабля, следовательно, дополнительная модуляция излучаемого шума связана с килевой и вертикальной качкой, определяющей периодическое изменение отстояния винта от поверхности (глубины погружения винта). Как результат, имеет место явление дополнительной модуляции излучаемого шума за счет флуктуирующей интерференции лучей.

Так как наблюдаемый процесс временных вариаций мощности принимаемого сигнала при соответствующей обработке (или даже просто на слух оператором) позволяет установить (измерить) период качки, то это может быть полезно в практике судовождения, а также для более точной классификации наблюдаемого (в режиме шумопеленгования) надводного объекта [5].

В связи с этим, представляет интерес установить связь спектра амплитудно-фазовой модуляции широкополосного сигнала корабля при его качке со спектром процесса качки.

2. Механизм образования дополнительной модуляции сигнала при качке

В ряде работ [6, 7] при исследовании флуктуационных явлений в акустике отмечалась необходимость учета явлений, связанных с качанием платформы, на которой закреплен излучатель. При этом установлено, что колебания платформы могут приводить к амплитудно-фазовой модуляции сигнала аналогично тому, как это происходит в условиях интерференции флуктуирующей многолучёвости [8].

Рассмотрим модель образования амплитудной модуляции сигнала надводного корабля как процесс флуктуирующей интерференции сигнала от вертикально качающегося точечного источника, находящегося вблизи поверхности моря. Такая модель упрощает реальную картину шумообразования, но выделяет основной процесс движения корабля как источника сигнала — вертикальную составляющую его колебания, которая присутствует при всех видах качки. Этого достаточно, чтобы установить важные закономерности акустических процессов и выразить их в аналитической форме [9–11].

Примем как условие задачи, что вертикальная координата эквивалентного источника звука, принадлежащего надводному кораблю, меняется во времени с учетом всех видов качки корабля, в общем случае, по некоторому случайному закону.

Для источника, находящегося вблизи поверхности, дальнейшее акустическое поле формируется в результате интерференции прямого $\overline{P_1(t)}$ и отраженного от поверхности $\overline{P_2(t)}$ сигналов (рис. 1).

Поскольку граница вода-воздух является свободной, то на ней должно выполняться условие для давления акустического поля $\overline{P(t)} = 0$, поэтому коэффициент отражения от границы равен -1 [12].

В результате для суммарного поля можно записать:

$$\overline{P(t)} = \overline{P_1(t)} - \overline{P_2(t)}, \quad (1)$$

где $\overline{P_1(t)}$ — вектор прямого сигнала; $\overline{P_2(t)}$ — вектор отраженного сигнала.

Для упрощения примем шумоизлучение узкополосным (или тональным). Не останавливаясь на обоснованности такого допущения относительно реального шумоизлучения, отметим, что решение задачи в такой постановке может дать ряд практически важных результатов.

Для тонального сигнала запишем:

$$\begin{aligned} \overline{P_1(t)} &= E \cdot \exp[i(\omega t + \varphi)], \\ \overline{P_2(t)} &= E \cdot \exp[i(\omega t + \varphi + \Delta\varphi)], \end{aligned}$$

где E , ω , φ — амплитуда, круговая частота и фаза сигнала; $\Delta\varphi$ — набег фазы отраженного сигнала; t — время.

На рис. 2 приведена векторная диаграмма взаимодействия двух акустических волн, одна из которых распространяется непосредственно к приемнику, а другая приходит к нему после отражения от поверхности (рис. 1). Результирующее поле двух лучей, вектор $\overline{P(t)}$, получаем согласно (1).

На практике нас интересует процесс, который пропорционален квадрату модуля вектора сигнала $|\overline{P(t)}|^2$, то есть квадрату его амплитудной огибающей, которую обозначим $U(t) = |\overline{P(t)}|^2$. На основании теоремы косинусов [13] из рис. 2 для квадрата модуля вектора $\overline{P(t)}$ можно записать:

$$U(t) = 2E^2(1 - \cos\Delta\varphi). \quad (2)$$

При этом набег фазы отраженного сигнала $\Delta\varphi = \omega\Delta t$, где Δt — время запаздывания отраженного сигнала, определяется геометрией распространения. Если принять приемник бесконечно удаленным от источника, то, как видно из рис. 1, для фазовой задержки получим:

$$\Delta\varphi = \omega \frac{\Delta S}{C} = 2kH \sin\alpha, \quad (3)$$

где $\Delta S = 2H\sin\alpha$, H — глубина погружения источника звука, α — угол скольжения луча у поверхности, C — скорость звука, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны.

По условиям рассматриваемой задачи глубина погружения источника меняется во времени относительно среднего значения H_0 , поэтому, обозначив $H(t) = H_0 + \delta_H(t)$, где $\delta_H(t)$ — случайный процесс, характеризующийся значением среднеквадратического отклонения σ_H , и нулевым средним значением $\mu_H = 0$, получим для набег фазы (3):

$$\Delta\varphi(t) = 2kH_0 \sin\alpha + 2k\delta_H \sin\alpha. \quad (4)$$

Тогда для выражения огибающей (2) с учетом (4) имеем:

$$U(t) = 2E^2 [1 - \cos(2kH_0 \sin\alpha + 2k\delta_H(t) \sin\alpha)]. \quad (5)$$

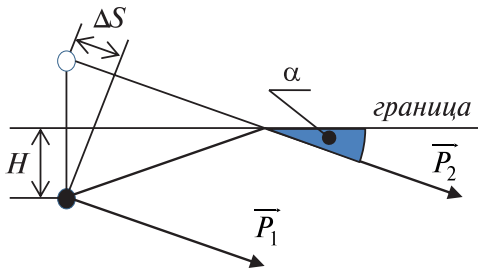


Рис. 1. Распространение лучей вблизи границы сред вода-воздух

Fig. 1. Beams propagation near the water — air interface

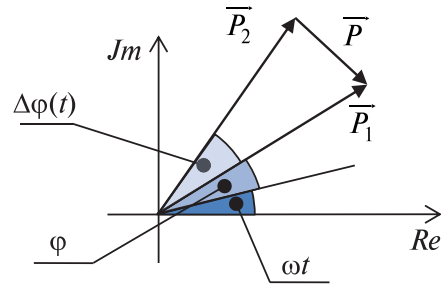


Рис. 2. Векторная диаграмма взаимодействия полей прямого и отраженного сигналов

Fig. 2. Vector diagram of interaction of the direct and reflected signals fields

Обозначим: $\Delta_\phi = 2kH_0 \sin \alpha$ — среднее значение набега фазы; $\delta_\phi = 2k\delta_H(t) \sin \alpha$ — флуктуации набега фазы.

Видно, что процесс флуктуации набега фазы δ_ϕ является производным от процесса флуктуации глубины $\delta_H(t)$, следовательно, он характеризуется нулевым средним значением $\mu_\phi = 0$ и значением среднеквадратического отклонения фазы $\sigma_\phi = 2k\sigma_H \sin \alpha$.

Тогда выражение (5) можно переписать с новыми переменными:

$$U(t) = 2E^2 [1 - \cos(\Delta_\phi + \delta_\phi)]. \quad (6)$$

Или, используя формулу для косинуса суммы:

$$U(t) = 2E^2 [1 - \cos \Delta_\phi \cos \delta_\phi + \sin \Delta_\phi \sin \delta_\phi]. \quad (7)$$

Фазовые изменения можно считать незначительными, когда $\delta_\phi \ll \pi/3$. Переходя к среднеквадратичным значениям, это условие примет вид:

$$\sigma_\phi = 2k\sigma_H \sin \alpha \ll 1, \quad (8)$$

где σ_H — значение среднеквадратического отклонения вертикальной составляющей движения эквивалентного источника, которое по условиям рассматриваемой задачи можно назвать акустической величиной качки.

Выражение (7) для рассматриваемых условий можно упростить, если принять $\sin \delta_\phi \approx \delta_\phi$, $\cos \delta_\phi \approx 1$, тогда получим

$$U(t) \approx 2E^2 [1 - \cos \Delta_\phi + \delta_\phi \sin \Delta_\phi]. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что огибающая имеет переменную составляющую $\delta_\phi = 2k\delta_H(t) \sin \alpha$, которая повторяет процесс качки $\delta_H(t)$.

При широкополосном сигнале для разных его гармоник, в общем случае, можно иметь различные значения $\Delta_\phi = 2kH_0 \sin \alpha$, которые дадут в результате разные количественные значения по формуле (9).

Можно выделить два крайних случая $\Delta_\phi = n\pi$ и $\Delta_\phi = n\pi - \pi/2$, где n — целое число. На гармониках, удовлетворяющих первому условию, когда $\sin \Delta_\phi \rightarrow 0$, влияние качки не проявляется. Для гармоник, соответствующих второму условию, можно записать:

$$U(t) \approx 2E^2 [1 \pm 2k\delta_H(t) \sin \alpha]. \quad (10)$$

Таким образом, во всем частотном диапазоне гармоник широкополосного сигнала влияние качки происходит с переменным проявлением, что позволяет считать, что интегрально эффект воздействия качки на сигнал сохраняется.

Рассмотренные условия интерференции акустического сигнала (8) можно определить как акустические условия «малой качки». В этих условиях результаты наблюдения процесса флуктуаций сигнала (10) можно отождествлять с процессом качки корабля. При этом, соотношение (8) характеризует такие совокупные условия по углу α , частоте сигнала и вертикальной составляющей процесса корабельной качки, когда изменения интерференционной картины поля вследствие качки незначительны. Происходит явление, которое можно рассматривать как незначительное «дрожание» интерференционной картины поля в вертикальной плоскости.

Иную картину можно наблюдать, когда значение $\sigma_\phi = 2k\sigma_H \sin \alpha \gg 1$. Эти условия в противоположность предыдущим можно назвать акустическими условиями «большой качки». С увеличением корабельной качки (или с увеличением частоты сигнала, угла скольжения луча) флуктуации уровня сигнала все в большей мере будут определяться пространственными перемещениями интерференционных максимумов, происходящими в процессе качки, которые в итоге приводят к нелинейному процессу. Механизм образования вариаций уровня сигнала в последнем случае достаточно хорошо изучен [14]. Анализ происходящих при этом процессов на качественном уровне показывает, что амплитуда вариаций уровня сигнала не будет зависеть от амплитуды качки. Вторым важным моментом, вытекающим из общего рассмотрения, является то, что спектр вариаций уровня сигнала в этих условиях будет зависеть не только от частоты качки, но и от ее амплитуды. Основываясь на выводах из работы [14], можно записать для спектра огибающей флуктуирующего сигнала в предельном случае:

$$F(\Omega) = \frac{E^2}{2} \frac{2\pi}{\sigma_\phi \Omega_H} \exp \left[-\frac{\Omega^2}{2\sigma_\phi^2 \Omega_H^2} \right],$$

где Ω — частота в спектре флуктуаций (огибающей) сигнала, Ω_H — характерная частота процесса корабельной качки.

Таким образом, энергетический спектр флуктуаций, получающийся в результате качки, является непрерывным и имеет форму гауссовой кривой с вершиной на частоте, равной $\Omega \rightarrow 0$. Заметим, что гауссова форма спектра получается в рассматриваемом случае $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha \gg 1$ при любом спектре процесса качки $H(t)$, а зависимость $F(\Omega)$ от энергетических характеристик процесса качки проявляется только через величины Ω_H и $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha$. Это видно по ширине спектра огибающей флуктуирующего сигнала.

Спектр флуктуаций существует в широком диапазоне частот с максимумом при $\Omega \rightarrow 0$, поэтому определим ширину спектра как

$$\Delta_\Omega = \frac{1}{F(0)} \int_0^\infty F(\Omega) d\Omega = \sigma_\varphi \Omega_H \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Таким образом, аналитические исследования спектрально-энергетических характеристик модуляции сигнала дают важные соотношения, определяющие основные закономерности изменения мощности, вида и ширины спектра модулирующего процесса в зависимости от параметра $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha$, характеризующего модулирующую значимость процесса корабельной качки, и от частотных параметров несущей. В частности, получаем, что в случае $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha \gg 1$ спектр флуктуаций огибающей сигнала (вследствие флуктуирующей интерференции многолучевости) не будет соответствовать спектру процесса качки.

3. Результаты компьютерного моделирования и натурного эксперимента

Справедливость представленных аналитических исследований и сделанных на их основе выводов подтверждают результаты компьютерного моделирования, а также результаты известных экспериментальных исследований [3].

При моделировании использовался процесс модуляции сигнала $U(t)$ в виде (6), нормированный к величине $2E^2$:

$$\frac{U(t)}{2E^2} = 1 - \cos[\Delta_\varphi + \delta_\varphi(t)]. \quad (11)$$

Здесь переменная $\delta_\varphi(t) = 2k\delta_H(t)\sin \alpha$, где $\delta_H(t)$ — процесс качки, который непосредственно моделировался как случайный процесс, характеризуемый средним квадратичным значением σ_H и нулевым средним.

Для моделирования качки, описываемой гауссовым распределением, генерировался случайный процесс $\Phi(t)$ с заданным спектром и мощностью, равной единице. Форма спектра процесса качки $\Phi(t)$ для моделирования была взята в виде нормального распределения с фиксированным положением на частотной оси. Результирующий процесс флуктуаций моделировался по формуле (11), где $\delta_\varphi(t) = K\Phi(t)$. Здесь коэффициент $K = 2k\sigma_H \sin \alpha$ задает совокупные условия по частоте (через волновое число k), углу скольжения луча (α) и глубине качки (σ_H), которые определяют спектральные характеристики модуляции сигнала при заданном спектре качки.

Используемый в моделировании вид спектра качки показан на рис. 3. На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования спектра модуляции при $K \leq 1$ и $K \geq 1$, соответственно. На всех графиках по оси частот отложены значения спектральных отсчетов, по вертикальной — значения амплитуды спектра мощности.

Видно, что при $K \leq 1$ спектр флуктуаций сигнала (рис. 4) повторяет заданную форму спектра процесса качки (рис. 3), и при этом мощность флуктуаций сигнала увеличивается при увеличении значения K . Максимум мощности флуктуации достигается при $K = 1$. Далее, при увеличении значения K совокупная мощность флуктуаций (мощность в полном диапазоне частот) остается постоянной, но форма спектра флуктуаций меняется (рис. 5). Дополнительно к основному максимуму, повторяющему форму спектра качки, появляется и увеличивается по амплитуде добавочный максимум. При значении K более четырех форма спектра флуктуаций полностью перестает соответствовать форме спектра качки.

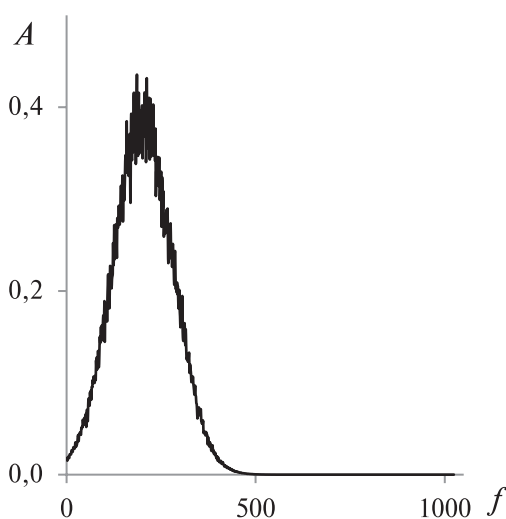


Рис. 3. Моделируемый спектр процесса качки $\Phi(t)$

Fig. 3. modelled spectrum of rolling and pitching process

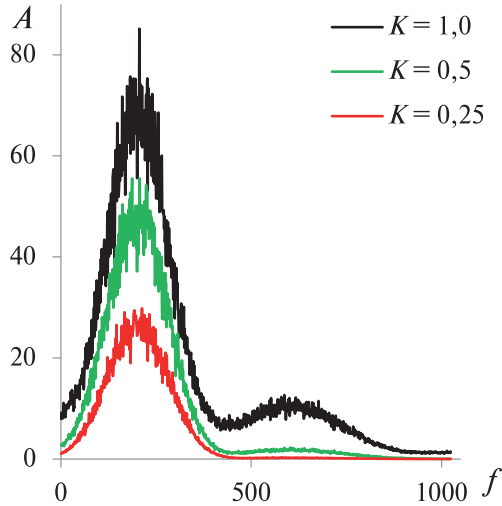


Рис. 4. Спектр флуктуаций при $K \leq 1$

Fig. 4. Fluctuations spectrum at $K \leq 1$

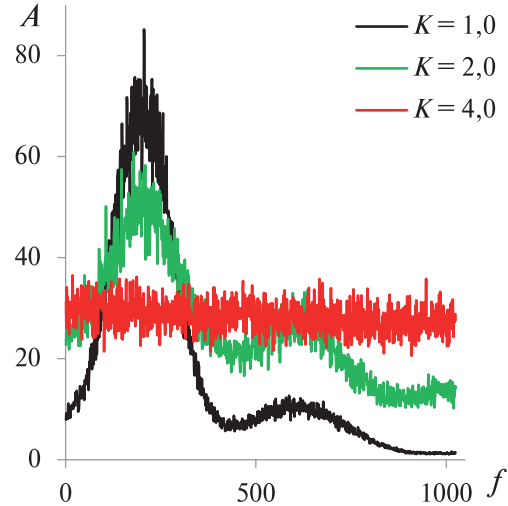


Рис. 5. Спектр флуктуаций при $K \geq 1$

Fig. 5. Fluctuations spectrum at $K \geq 1$

Полученный результат компьютерного моделирования подтверждается результатами анализа реальных записей шумовых сигналов, полученных в натурных условиях, ранее приведенными в работе [3]. На рис. 6 приведены примеры спектров амплитудной модуляции принимаемого сигнала при наличии качки корабля-источника шума вследствие волнения моря. По оси абсцисс отложена частота модуляции (f , Гц), по оси ординат — варьируемая средняя частота полосового фильтра спектроанализатора (Fsr , кГц). Амплитудные спектры приведены в яркостном виде (максимум соответствует желтому цвету, минимум — черному). На рис. 6, а приведен спектр модуляции для корабля среднего водоизмещения в условиях сплошной освещенности, на рис. 6, б и в приведены спектры модуляции для корабля большого водоизмещения в условиях наличия подводного звукового канала для различных расстояний между источником и приемником, соответственно.

Из приведенных примеров видно, что спектр модуляции в зависимости от частотной гармонике сигнала имеет разный характер.

Необходимо обратить внимание на частотный диапазон шумового сигнала, в котором заметны проявления модуляции. Для одних условий — это частоты от 0,5 до 2 кГц (рис. 6, а). Для других условий модуляция особенно ярко проявляется на частотах сигнала от 1,0 до 3 кГц (рис. 6, б) и от 3,0 до 5,0 кГц (рис. 6, в). Это хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования (рис. 4, 5). Как видно на рис. 6, при увеличении коэффициента K (при $K \gg 1$), что может происходить при увеличении частоты сигнала более

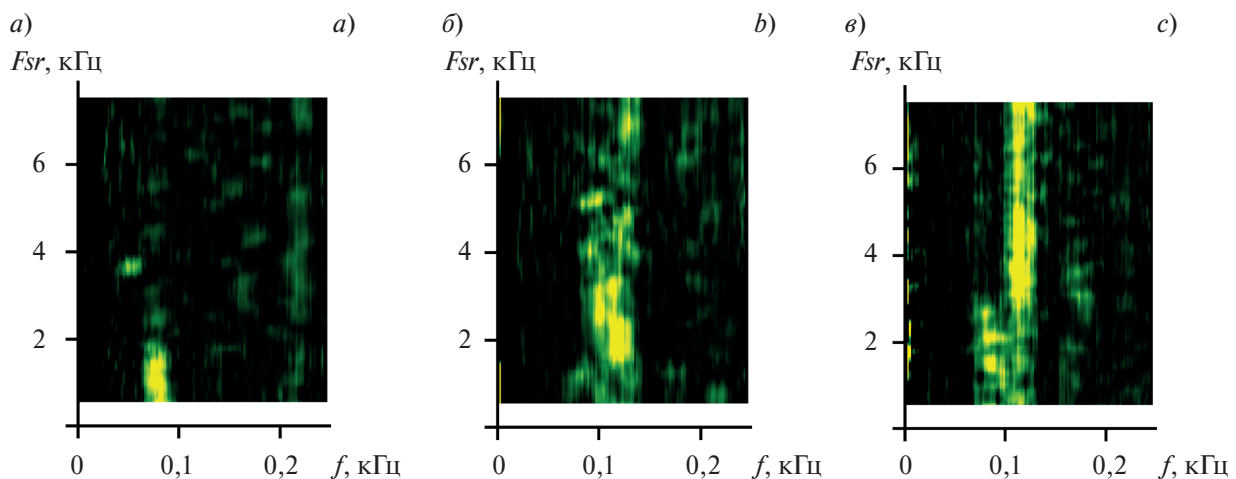


Рис. 6. Примеры яркостного спектра модуляции в диапазоне качки

Fig. 6. Examples of the brightness modulation spectrum within the rolling and pitching spectrum

3 кГц (рис. 6, б) и более 5,0 кГц (рис. 6, в), амплитуда модуляции уменьшается (рис. 5). На малых частотах, когда значение параметра K (при $K \ll 1$) падает, менее 1 кГц (рис. 6, б) и менее 3 кГц (рис. 6, в) амплитуда модуляции также падает, что согласуется с результатами моделирования на рис. 4.

4. Заключение

Аналитические выкладки, компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что явление дополнительной модуляции сигнала при качке корабля может быть объяснено образованием флуктуирующей интерференции лучей, распространяющихся от вертикально качающегося источника. При этом спектрально-энергетические характеристики модуляции зависят от совокупных условий, которые характеризуются значением параметра $K = 2k\sigma_H \sin \alpha$, где k — волновое число, σ_H — среднеквадратичное значение вертикальной составляющей качки, α — угол скольжения луча у поверхности, разделяющих физический процесс образования модуляции на два типа. При значении $K < 1$ результаты наблюдения процесса модуляции сигнала можно отождествлять с процессом качки корабля. При значении $K > 1$ спектр модуляции сигнала не будет соответствовать спектру процесса качки.

Литература

1. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шума морских объектов // Акустический журнал. 2003. Т. 49, № 2. С. 224–228.
2. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. 2013. Т. 59, № 3. С. 347–353. doi:10.7868/S0320791913030106
3. Консон А.Д., Волкова А.А. Обнаружение амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов при качке на фоне сверхнизкочастотных флуктуаций // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 2. С. 12–19. doi:10.7868/S2073667319020023
4. Ремез Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983. 328 с.
5. Войткунский Я.И. и др. Справочник по теории корабля: В трех томах. Т. 2. Статика судов. Качка судов. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
6. Акустика океана / Под ред. акад. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 694 с.
7. Лаваль Р., Лабаск И. Влияние неоднородностей и неустойчивости среды на пространственную и временную обработку сигналов // Подводная акустика и обработка сигналов / Под ред. Л. Бьёрнэ. М.: Мир, 1985. 488 с.
8. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. М.: Связь, 1971. 185 с.
9. Консон А.Д. Спектр флуктуации мощности сигнала, излучаемого кораблем при качке // Судостроение. 1997. Вып. 6. С. 46–48.
10. Консон А.Д. Синтез амплитудно-частотных характеристик фильтра для приема шумовых гидроакустических сигналов // Судостроение. 1998. Вып. 2. С. 41–42.
11. Консон А.Д. О корреляционных характеристиках флуктуации мощности шумового сигнала, излучаемого надводным кораблем // Акустический журнал. 1999. Т. 45, № 4. С. 523–527.
12. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1957. 608 с.
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1975.

References

1. Kudryavtsev A.A., Luginets K.P., Mashoshin A.I. Amplitude modulation of underwater noise produced by seagoing vessels. *Acoustical Physics*. 2003, 49, 2, 184–188. doi:10.1134/1.1560380
2. Mashoshin A.I. Optimization of a device for detecting and measuring parameters of amplitude modulation of underwater noise emission of seagoing vessels. *Acoustical Physics*. 2013, 59, 3, 347–353. doi:10.1134/S106377101303010X
3. Konson A.D., Volkova A.A. Detection of amplitude modulation of underwater noise emission of sea vessels at rolling and pitching against ultralow frequency fluctuations. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019, 12, 2, 12–19 (in Russian). doi:10.7868/S2073667319020023
4. Remise Yu.V. Rolling and pitching of the ship. *Leningrad, Sudostroyeniye*, 1983, 328 p. (in Russian).
5. Voytkunsky Ya.I. et al. Handbook on the theory of the ship: In three volumes. Volume 2. Statics of vessels. Rolling and pitching of vessels. *Leningrad, Sudostroyeniye*, 1985, 440 p. (in Russian).

6. Acoustics of the ocean / Ed. L.M. Brekhovsky. *Moscow, Nauka*, 1974. (in Russian).
7. Laval R., Labask I. Influence of nonuniformity and instability of the environment on spatial and time signal processing. *Underwater Acoustics and Signal Processing*, ed. L. Byornyo. *Moscow, Mir*, 1985, 488 p. (in Russian).
8. Dolukhanov M.P. Fluctuation Processes at Radio Wave Propagation. *Moscow, Svyaz'*, 1971. 185 p. (in Russian)
9. Konson A.D. The spectrum of power fluctuation of signal, radiated by ship at rolling and pitching. *Sudostroyeniye*. 1997, 6, 46–48 (in Russian).
10. Konson A.D. Synthesis of amplitude-frequency characteristics of the filter for noise hydroacoustic signal reception. *Shipbuilding*. 1998, 2, 41–42 (in Russian).
11. Konson A.D. Correlation of power fluctuations in the noise signal emitted by a surface ship. *Acoustical Physics*. 1999, 45, 4, 462–466.
12. Brekhovsky L.M. Waves in stratified media. *Moscow, Nauka*, 1973, 344 p. (in Russian).
13. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook on mathematics. *Moscow, Publishing house of technical and theoretical literature*, 1957, 608 p. (in Russian).
14. Levin B.R. Theoretical bases of statistical radio engineering. *Moscow, Soviet Radio*, 1975. (in Russian).

Об авторах

КОНСОН Александр Давидович, РИНЦ AuthorID: 735464, e-mail: wolkova.aa@yandex.ru
ВОЛКОВА Анна Александровна, РИНЦ AuthorID: 706716, e-mail: adkonson@gmail.com

УДК 556.55

© В. М. Степаненко^{1,2*}, В. А. Ломов^{1,3}, М. Г. Гречушникова^{1,4}, 2022

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, ул. Ленинские горы, д. 1, г. Москва, Россия

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Российская академия наук,
119017, Пыжевский пер. 3, стр. 1, г. Москва, Россия

⁴Институт водных проблем, Российская академия наук, 119333, ул. Губкина, д. 3, г. Москва, Россия

*stepanen@srcc.msu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Статья поступила в редакцию 14.12.2021, после доработки 01.05.2022, принята в печать 17.10.2022

Аннотация

Получены оценки эмиссии метана с поверхности Можайского водохранилища за период с 2015 по 2019 гг. с помощью математической модели LAKE2.3. Среднее значение эмиссии составляет 361 тС в год, средний удельный поток — $37,7 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$, что удовлетворительно согласуется с данными наблюдений. Наибольший вклад в общую эмиссию CH_4 вносит пузырьковая составляющая. В течение периода нагревания наблюдается постепенное увеличение эмиссии метана с максимумом перед началом осеннего перемешивания. В ходе численных экспериментов с моделью установлено, что высокочастотная изменчивость потоков метана в атмосферу связана с колебаниями атмосферного давления и резкими изменениями уровня воды при том, что наиболее значимые выбросы связаны с последним фактором. Эффективным способом для калибровки диффузной составляющей потока метана в атмосферу является потенциальная наибольшая скорость окисления метана в реакции Михаэлиса–Ментен, а для пузырькового потока — параметр температурной зависимости генерации метана в донных отложениях q_{10} . Исследование чувствительности эмиссии метана к указанным параметрам проведено на основе численной модели LAKE2.3.

Ключевые слова: водохранилища, метан, математическое моделирование, эмиссия метана

© V. M. Stepanenko^{1,2*}, V. A. Lomov^{1,3}, M. G. Grechushnikova^{1,4}, 2022

¹Lomonosov Moscow State University, 119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia

²Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

³A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics, Russian Academy of Sciences,
119017, Pyzhevsky per., 3/1, Moscow, Russia,

⁴Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, 119333, Gubkina st., 3, Moscow, Russia

*stepanen@srcc.msu.ru

NUMERICAL SIMULATION OF TEMPORAL VARIABILITY OF METHANE EMISSIONS FROM MOZHAYSK RESERVOIR

Received 14.12.2021, Revised 01.05.2022, Accepted 17.10.2022

Abstract

Estimates of methane emission from the Mozhaysk reservoir surface were carried out using the mathematical model LAKE2.3. The average emission value is 361 tC per year, the average flux = $37.7 \text{ mgC—CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Comparison of the obtained estimates with *in situ* measurements revealed, that the methane emission and specific flux according to the model are in good agreement with the observations data. The ebullition makes the largest contribution to the total emission. During the heating period, an increase of methane emission is observed with a maximum before the autumn mixing stage. In the course of numerical experiments with the model, it was found that the amplitude of methane fluxes into the atmosphere is associated with fluctuations in atmospheric pressure, and the most significant emissions peaks associated with water level drawdowns. Effective method for calibrating the

Ссылка для цитирования: Степаненко В.М., Ломов В.А., Гречушникова М.Г. Численное моделирование временной изменчивости эмиссии метана из Можайского водохранилища // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 82–100. doi:10.48612/fpg/umx3-6tet-vhkr

For citation: Stepanenko V.M., Lomov V.A., Grechushnikova M.G. Numerical Simulation of Temporal Variability of Methane Emissions from Mozhaysk Reservoir. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 82–100. doi:10.48612/fpg/umx3-6tet-vhkr

diffusion component of the methane flux into the atmosphere is the potential rate of methane oxidation in the Michaelis-Menten reaction, and for ebullition it is the methane generation parameter in bottom sediments — q_{10} . For the described numerical experiments, the article presents the values of the annual emissions of methane into the atmosphere.

Keywords: artificial reservoirs, methane, mathematical modeling, methane emission

1. Введение

К наиболее важным парниковым газам в атмосфере относятся углекислый газ и метан. Метан весьма значим для парникового эффекта, поскольку имеет высокий потенциал глобального потепления в расчёте на одну молекулу, в 28 раз превышающий потенциал диоксида углерода [1]. Кроме того, относительные темпы роста содержания метана в атмосфере значительно превышают таковые для CO_2 и N_2O (167 % — рост среднеглобальной приземной концентрации метана относительно доиндустриального периода против 46 % для CO_2 и 24 % для N_2O [2]).

Источники метана в атмосфере разделяют на природные и антропогенные. К важнейшим природным источникам относятся болота, озера и лесные экосистемы (особенно тропического пояса). Антропогенные источники метана в атмосфере — это свалки твёрдых бытовых отходов, сельское хозяйство (в особенности рисовые поля и пастбища крупного рогатого скота), промышленность, разработки газовых и нефтяных месторождений и т.д. [3]. Заметным антропогенным источником метана для атмосферы являются также искусственные водоемы.

По различным оценкам эмиссия метана из этих объектов составляет от 2 до 122 Тг/год, или от 0,5 до 10 % от суммарного потока метана в атмосферу с земной поверхности [4–8]. Оценки глобальной эмиссии метана с водохранилищ значительно различаются, что связано с методикой расчёта, а также с различием используемых наборов данных. Методики расчёта предполагают экстраполяцию статистических связей, полученных на исследованных объектах, на неизученные водохранилища, например, по признаку принадлежности к одной и той же климатической зоне [7]. Это существенно ограничивает точность глобальных оценок.

Более обоснованная методика оценки эмиссии CH_4 с поверхности водных объектов, не охваченных измерениями или покрытых ограниченным набором измерений, заключается в математическом моделировании ключевых процессов образования, потребления, переноса и эмиссии метана из водоёма. Модель необходимо протестировать и откалибровать на тех водохранилищах, где пространственно-временная неоднородность потоков метана детально изучена. Определив значения наиболее важных параметров модели и рассчитав временной ход потоков метана на границе «вода–атмосфера», можно получить уточнённые оценки потока метана для водоемов, при наличии информации об их основных морфометрических, гидрологических, экологических и климатических характеристиках.

Такие оценки могут быть получены с помощью одномерной термогидродинамической модели с блоком расчёта биогеохимических процессов LAKE [9–10]. Модели такого типа использовались ранее для оценки эмиссии метана из слабопроточных озёр естественного происхождения [11–17]. В то же время, искусственные водные объекты характеризуются значительной горизонтальной неоднородностью распределения как физических, так и биогеохимических переменных. Поэтому основной задачей настоящего исследования является оценка применимости одномерного (по вертикали) подхода к воспроизведению концентрации и потоков метана в водохранилищах на примере модели LAKE.

Для того, чтобы адаптировать модель к особенностям гидролого-гидрохимического режима водохранилищ, необходима верификация результатов расчётов на хорошо изученном водном объекте. В качестве такого объекта было выбрано Можайское водохранилище. В данной работе представлены результаты оценок эмиссии метана с Можайского водохранилища по натурным данным и по расчетам модели LAKE, а также возможные пути улучшения качества моделирования на основе сравнения модельных результатов с натурными данными, для получения более точных оценок эмиссии метана с искусственных водоемов.

Во Введении приводятся общие сведения о процессах, обуславливающих потоки метана в водной толще и на поверхности водного объекта; в разделе Материалы и методы описаны основной объект исследования — Можайское водохранилище, методы инструментальных наблюдений и модель LAKE; в Результаты и обсуждении представлены результаты расчета эмиссии метана из Можайского водохранилища, сопоставление с эмпирическими данными, а также оценка влияния ряда факторов на эмиссию метана на основе численных экспериментов с моделью.

1.1. Метан в экосистеме водохранилищ

Основной источник метана в водной толще — это анаэробное разложение органического вещества в грунтах (рис. 1).

Даже небольшое наличие кислорода в придонных горизонтах может ингибировать деятельность архей — главных агентов анаэробной (при отсутствии кислорода) деструкции (разложении) органического вещества (ОВ) [18]. Основные пути образования метана в грунтах — это гидрогенотрофный (образование из HCO_3^- иона или CO_2) и ацетокластический (образование из CH_3COO^-) пути. Как правило, для верхней части донных отложений преобладает ацетокластическая цепочка разложения ОВ, а в более глубоких слоях основной вклад начинает вносить гидрогенотрофный путь [19].

Кроме того, важен состав ОВ, поступающего к донным отложениям — при поступлении лабильной (быстрорастворимой) органики продукция метана значительно ускоряется [21].

Метан, образованный в донных отложениях, может поступать к поверхности воды в виде двух основных составляющих потока: диффузного и пузырькового. Помимо образования метана непосредственно в донных отложениях, стоит отметить также образование его при разложении макрофитной растительности на мелководьях. Диффузный поток зависит от градиента концентрации растворенного в воде метана, а также коэффициента диффузии. При попадании в горизонты воды, насыщенные кислородом, метан подвержен окислению метанотрофными микроорганизмами. Около 90 % диффузного потока может окисляться при переносе к поверхности воды [22]. Из-за этого, содержание CH_4 увеличивается от поверхности к придонным горизонтам [23]. Скорость окисления метана в водной толще и в донных отложениях при наличии кислорода зависит от концентрации метана и кислорода [24].

Главное отличие пузырьковой составляющей потока метана состоит в том, что он достигает поверхности значительно быстрее диффузного и не подвержен окислению. Однако имеет место растворение пузырьков газа в водной толще, особенно пузырьков большого диаметра [25]. На пузырьковый поток метана существенное влияние оказывает глубина водоема, а также динамика уровня воды. Так, например, для водохранилищ характерны резкие сбросы уровня при регулировании стока. Резкое падение гидростатического давления при снижении уровня является причиной образования большого количества пузырьков в донных отложениях [26]. Сам уровень воды имеет большое значение для величины пузырькового потока — при меньшем расстоянии, которое проходит пузырек от донных отложений к поверхности, меньше доля молекул газа, перешедших в растворённую фазу и подвергнутых впоследствии окислению [27].

Важным показателем, влияющим на потоки метана в водохранилище, является его трофность — характеристика биопродуктивности водоемов. Увеличение фосфорной нагрузки на водоем и росте содержания хлорофилла в воде, по результатам существующих оценок, приводят к увеличению эмиссии метана из водоемов суши на 30–90 % и даже может приблизить озера и водохранилища к болотам по значениям годового выброса метана в атмосферу [28]. Для водоемов повышенного трофического уровня, наибольшее увеличение эмис-

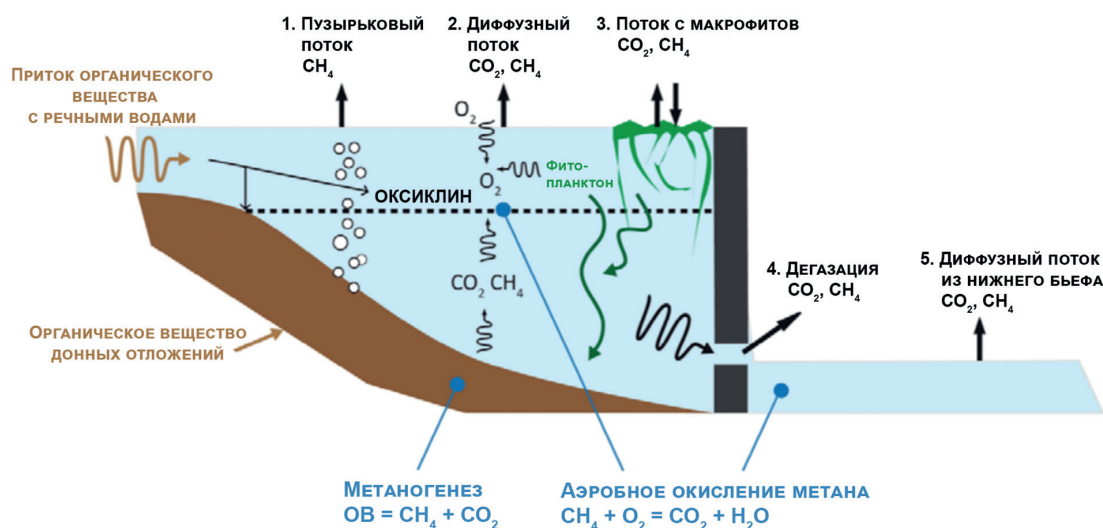


Рис. 1. Схема распределения потоков и преобразования метана в водохранилище [20]

Fig. 1. Scheme of methane fluxes distribution and its transformation in reservoir [20]

сии метана будет происходить при возникновении цветения водоемов, когда бурное развитие фитопланктона приводит к значительному увеличению первичной продукции [29]. При цветении значительно увеличивается скорость седиментации и количество поступающего лабильного ОВ ко дну, что приводит к быстрому истощению кислорода в придонных горизонтах и интенсификации анаэробного образования метана.

При рассмотрении эмиссии метана из водохранилищ также важно учитывать горизонтальные составляющие потока, помимо описанных выше вертикальных. Большой вклад в эмиссию метана для многих искусственных зарегулированных водоемов играет дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф гидроузлов. Для высокопроточных глубоких водохранилищ выход метана при дегазации может составлять около 70 % от эмиссии с поверхности воды [30].

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования

В качестве основного объекта исследования и проверки модели было выбрано Можайское водохранилище. Это небольшое морфологически простое долинное водохранилище в Московской области с замедленным водообменом (табл. 1).

Были выбраны пять опорных станций наблюдений над затопленным речным руслом для изучения пространственной неоднородности потоков метана в водоеме (рис. 2) [31]. Такое расположение станций измерений — на равномерном удалении друг от друга по длине всего водоема позволяет исследовать распределение изучаемых характеристик по продольному профилю от верховьев, подверженных влиянию втекающих рек, к зоне трансформации в среднем течении водоема и до нижней части с более спокойным озерным режимом. Кроме измерений над затопленным речным руслом реки Москвы, измерения также проводились и на других морфологических участках в пределах выделенных отсеков — над затопленной поймой и террасой долины реки.

Таблица 1

Table 1

Морфологические характеристики Можайского водохранилища (все характеристики приведены для нормального подпорного уровня (НПУ)) [31]

Morphological characteristics of Mozhaysk Reservoir (all characteristics are given for Full Supply Level (FSL)) [31]

Длина, км	Наиб. ширина, м	Средняя ширина, м	Наиб. глубина, м	Площадь, км ²	Объем, км ³	Размах колебаний уровня, м/год	Коэффициент водообмена, год ⁻¹
28	2,6	1,1	22,6	30,7	0,24	6	1,78

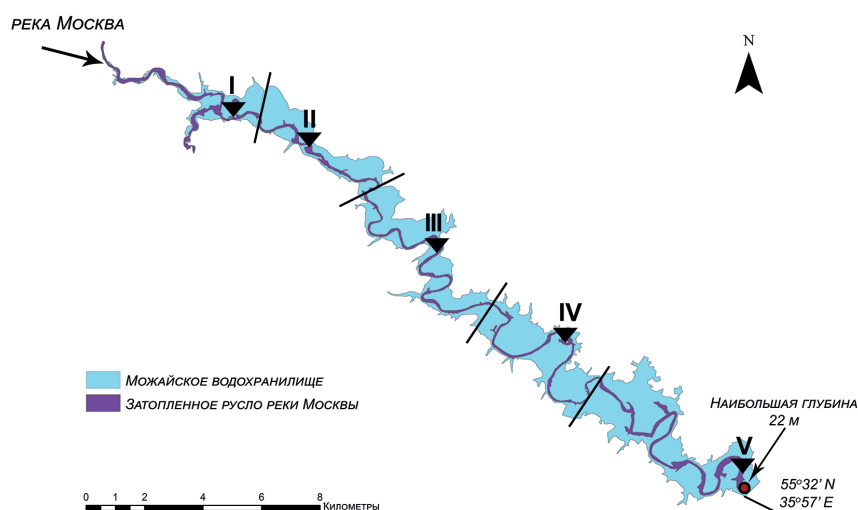


Рис. 2. Схема Можайского водохранилища с разделением на отсеки по критерию однородности гидро-морфологических условий. Римскими цифрами I–V показаны опорные станции наблюдений концентрации и потоков метана за 2016–2021 гг.

Fig. 2. Scheme of Mozhaysk Reservoir with separation by parts based on similar hydro-morphological conditions. Roman numerals I–V shows measurement stations locations during 2016–2021 years

2.2. Методы натурных наблюдений

В настоящей работе поток метана измеряется методом плавучих камер [20, 32]. Он основан на измерении разницы концентрации в камере, которая устанавливается на воду, в начале и в конце экспозиции. В работе использовались общая камера — для определения суммы пузырькового и диффузного потока, и диффузная, которая отличается наличием экрана, отсекающего пузырьковый поток. Время постановки камеры варьировалось от 30 мин до 1,5 ч. Одновременно с измерением потоков метана в атмосферу производился отбор проб воды на содержание растворенного метана с помощью метода «headspace» [20]. Отбирались пробы с поверхностного и придонного горизонтов, а также выше и ниже слоя наибольшего градиента плотности при наличии устойчивой температурной стратификации. Все измерения сопровождалось зондированием водной толщ приборами YSI ProODO и Pro30, в ходе которого измерялась температура воды, электропроводность, содержание растворенного в воде кислорода. Помимо этого, определялись температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра.

2.3. Модель LAKE: описание модели и постановки численных экспериментов

Модель LAKE — это одномерная (с частичным представлением горизонтальной неоднородности) термогидродинамическая модель с блоком расчета биогеохимических процессов, ответственных за формирование водной концентрации метана и углекислого газа. Модель применялась для расчёта термодинамического режима водохранилищ, а также содержания CO_2 [33] и CH_4 [10]. Для оценки потока из водохранилища была использована версия модели LAKE2.3, кратко изложенная ниже.

В настоящем разделе даётся общее описание математической модели со ссылками на публикации, в которых отдельные блоки изложены более подробно. Особое внимание уделено представлению в модели физических механизмов и биогеохимических эффектов, связанных с проточностью водоёма, поскольку они главным образом отличают версию модели 2.3 от предыдущих.

Одномерные по вертикали уравнения термогидродинамики и биогеохимии водоёма являются результатом операции осреднения по горизонтальному сечению водного объекта (рис. 3), применённой к трёхмерным уравнениям для горизонтальных компонент импульса, уравнению неразрывности, уравнению притока тепла, уравнениям баланса примесей.

Результирующий вид одномерного уравнения для скалярной величины f (в т. ч. любой из горизонтальных компонент скорости u , v) в несжимаемой жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = -\frac{1}{A} \oint_{\Gamma_A} f \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl - \frac{1}{A} \frac{\partial A \bar{w} \bar{f}}{\partial z} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[A (k_T + k_m) \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \right] - \frac{1}{A} \frac{\partial A \bar{\Phi}_f}{\partial z} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left(F_{f, \Gamma_{A(z)}} + \Phi_{f, A(z)} \right) + \bar{R}, \quad (1)$$

где z — вертикальная координата, направленная вдоль силы тяжести, с началом на поверхности водоёма, t — время, $A(z)$ — горизонтальное сечение, $\Gamma_{A(z)}$ — замкнутая граница сечения $A(z)$, dl — элемент длины границы $\Gamma_{A(z)}$ (рис. 3), $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к $\Gamma_{A(z)}$, $\mathbf{u} = (u, v)$ — горизонтальная составляющая скорости, w — вертикальная проекция скорости, F_f — суммарный диффузионный поток величины f за счёт турбулентности и молекулярного обмена, Φ_f — сумма недиффузионных и неадвективных потоков величины f (например, поток радиации в уравнении для температуры, пузырьковый поток в уравнениях для растворённых газов), $F_{f, \Gamma_{A(z)}}$, $\Phi_{f, \Gamma_{A(z)}}$ — значения соответствующих потоков на $\Gamma_{A(z)}$, т. е. на дне глубины z (в пределах $\Gamma_{A(z)}$ эти потоки принимаются постоянными), R — сумма всех членов исходного трёхмерного уравнения, кроме полной производной и дивергенции потоков (т. е. источники и стоки в уравнениях для биогеохимических веществ, градиент давления и сила Кориолиса — в уравнениях движения и т. д.). Уравнение (1) справедливо для случая дна с малыми уклонами (так что горизонтальными компонентами диффузионных потоков и вертикальной скоростью на дне можно пренебречь), а также для водоёма, образованного вертикальными стенками с нулевыми диффузионными потоками и горизонтальным дном. В контексте настоящего исследования проточного водоёма особый интерес представляют первое и второе слагаемые в правой части (1), поскольку они отвечают за привнесение, вынос величины f притоками и истоком и за адвекцию средней вертикальной скоростью, соответственно. Уравнения в форме (1) записываются для следующих величин:

- горизонтальные компоненты скорости;
- температура;
- солёность (минерализация);
- концентрация растворённого кислорода, метана;

— концентрация атомов углерода в составе следующих форм: живые органические частицы (фито- и зоопланктон), отмершие органические частицы (детрит), автохтонный и аллохтонный растворённый органический углерод, растворённый неорганический углерод;

— концентрация атомов фосфора в составе растворённого неорганического фосфора (фосфатов).

Уравнения вида (1) дополняются краевыми условиями на верхней и нижней границах. Так, для температуры задаётся уравнение теплового баланса на верхней границе ($z = 0$) и условие непрерывности температуры и потока тепла при $z = H$ (H — максимальная глубина водоёма). Тепловой баланс на поверхности рассчитывается при заданных временных рядах потоков коротковолновой, длинноволновой радиации и основных метеорологических величин (потоки явного, скрытого тепла и импульса вычисляются при этом по теории подобия Монина-Обухова [34, 35]).

Уравнение для средней вертикальной скорости получается осреднением по горизонтали уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial A\bar{w}}{\partial z} = - \oint_{\Gamma_A} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl, \quad (2)$$

с условием непротекания $\bar{w}|_{z=H} = 0$.

С привлечением (2) получается уравнение для H :

$$\frac{dH}{dt} = r - E - \frac{1}{A(0)} \int_0^H \oint_{\Gamma_A} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl dz + M, \quad (3)$$

которое выражает изменение уровня воды в результате неравенства расходов втекающих и вытекающих водотоков, атмосферных осадков r , испарения E с поверхности, а также процессов замерзания и таяния ледяного и снежного покрова (представлены слагаемым M).

Система, состоящая из одномерных уравнений типа (1) и уравнения неразрывности (2), замыкается с привлечением дополнительных гипотез и параметризаций [9]. Так, для расчёта коэффициентов турбулентной вязкости и температуропроводности (диффузии) используется турбулентное замыкание $k - \epsilon$; в выражение для коэффициента температуропроводности (диффузии) также аддитивно входит коэффициент «фоновой диффузии», представляющий перемешивание за счёт обрушения внутренних волн и других неучтённых в стандартных турбулентных замыканиях эффектов. Также важную роль играют параметризации потоков скалярных величин и импульса на поверхности дна $F_{f, \Gamma_{A(z)}}$, $\Phi_{f, \Gamma_{A(z)}}$ при $z < H$. Потоки тепла и метана на дне находятся путём решения дополнительных одномерных задач для температуры и метана в слоях (колонках) донных отложений, имеющих границу с водной средой на разных глубинах [9], в т. ч. на максимальной глубине, так что сумма этих границ составляет всё дно водоёма (рис. 3). Поток импульса через поверхность дна $\left(F_{u, \Gamma_{A(z)}}, F_{v, \Gamma_{A(z)}} \right)$ вычисляется по линейному или квадратическому по средней скорости $(\bar{u}, \bar{v})$ закону с калибровочным множителем.

Одномерная модель тепловлагопереноса в донных отложениях учитывает возможность фазовых переходов воды. Уравнение для концентрации метана в отложениях включает генерацию, молекулярную диффузию, удаление метана в виде пузырьков при превышении критического содержания [11].

Недиффузионные и неадвективные потоки Φ_f — это кинематический поток радиации $\Phi_T = S$ в уравнении притока тепла (рассчитывается по закону Бэра-Бутера-Ламберта в инфракрасном, фотосинтетически-активном¹, ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах) и пузырьковый поток в уравнениях для концентраций растворённого кислорода, углекислого газа и метана. Модель пузырька основана на параметризациях из работы [36] и учитывает обмен между водной средой и пузырьком пятью газами: O_2 , CO_2 , CH_4 , N_2 , Ar .

Отдельная задача заключается в построении параметризаций для слагаемых $\bar{R}$ в одномерных моделях. Так, параметризация осреднённого горизонтального градиента давления в уравнениях движения модели LAKE позволяет воспроизвести в модели сейши с горизонтальным волновым номером 1 [10]. Источники и стоки $\bar{R}$ в уравнениях для биогеохимических величин задаются с привлечением параметризаций, предложенных в работах [15, 37–41] и учитывают следующие процессы:

— фотосинтез, дыхание, выделения и отмирание фито- и зоопланктона;

¹ Спектральный интервал фотосинтетически-активной радиации (ФАР) практически совпадает с интервалом видимого света, так что коэффициент ослабления ФАР в водной среде может быть с удовлетворительной точностью измерен визуальными методами, например, с применением диска Секки.

- аэробное разложение растворённых органических соединений и детрита;
- фотохимическое разложение растворённых органических соединений;
- аэробное окисление метана.

Поглощение растворённого кислорода донными отложениями с выделением растворённого неорганического углерода и фосфора выражаются членами $F_{f, \Gamma_{A(z)}}$ в уравнениях баланса этих величин согласно работе [42].

Представленная выше одномерная модель с частичным представлением горизонтальной неоднородности позволяет рассчитывать следующие потоки растворённых газов в атмосферу:

- диффузный поток с поверхности водоёма (коэффициент газообмена рассчитывается по модели обновления поверхности [43]);
- пузырьковые потоки, рассчитываемые отдельно над слоями донных отложений, находящимися на разных глубинах (рис. 3);
- адвективный поток через вытекающий водоток (турбины в случае гидроэлектростанций).

Модель включает многослойные модули расчёта переноса тепла и жидкой влаги в слоях льда и снега [44].

Концентрация метана в донных отложениях определяется интенсивностью четырех процессов: производством, окислением, пузырьковым стоком и диффузией.

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left(k_{CH_4} \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial z_s} \right) + P_{soil, CH_4} - E_{soil, CH_4} - O_{soil, CH_4}. \quad (4)$$

Здесь P_{soil, CH_4} и $\dot{A}_{soil, CH_4}$ — скорости производства и пузырькового стока метана соответственно, O_{soil, CH_4} — скорость аэробного окисления метана, C_{CH_4} — это концентрация метана в поровом растворе, k_{CH_4} — коэффициент вертикальной диффузии метана в донных отложениях, зависящий от температуры и «коэффициента извилистости», отвечающего за увеличение пути диффузии газа в донных осадках по сравнению с жидким раствором.

Основной субстрат для производства метана — это органическое вещество, осаждающееся на дно виде детрита или пеллет. Важной характеристикой этого субстрата является возраст донных отложений. Также важна температура, как определяющий фактор всех биологических процессов, и содержание растворенного кислорода, при котором ингибируется деятельность метаногенов. Таким образом может быть составлено уравнение:

$$P_{soil, CH_{4,i}} = P_{i,0} \rho_i^* H(T - T_{mp}) q_{10}^{T/10} (1 + \alpha_{O_2, inhib} C_{O_2})^{-1}, \quad (5)$$

где $P_{i,0}$ — это калибруемый параметр начальной скорости продукции метана. H — функция Хэвисайта, которая при температуре, меньшей 0°C обращается в 0, функция $q_{10}(T)$ отвечает за изменение скорости генерации метана в зависимости от температуры, $\alpha_{O_2, inhib}$ — константа ингибирования продуцирования метана (ингибирование линейно зависит от концентрации кислорода). ρ_i^* — плотность органической массы.

Математическое описание скорости окисления метана можно получить, используя кинетику ферментативных реакций Михаэлис — Ментен:

$$O_{CH_4} = V_{max} \exp \left[-\frac{\Delta E_{ox, CH_4}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \frac{C_{CH_4}}{K_{hs, CH_4} + C_{CH_4}} \frac{C_{O_2}}{K_{hs, O_2} + C_{O_2}}. \quad (6)$$

Стоит отметить, что реакция не лимитируется концентрациями продуктов реакции, так как их содержание в водоеме по отношению к количеству их образования в реакции настолько высоко, что этим ограничением можно пренебречь. Следовательно, в уравнении (6) рассматриваются только непосредственно метан и кислород. В кинетике ферментативных реакций учитывается максимальная скорость окисления метана V_{max} , энергия, необходимая для активации реакции $\Delta E_{ox, CH_4}$, и константы полунасыщения для кислорода K_{hs, O_2} и метана K_{hs, CH_4} .

Изменение содержания метана в водной толще описывается уравнением:

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = Dif_A(C_{CH_4}) + \frac{F_{CH_{4,b}}}{A} \frac{dA}{dz} + B_{CH_4} + O_{CH_4}, \quad (7)$$

где $Dif_A(C_{CH_4})$ — скорость вертикальной диффузии метана (зависит преимущественно от разницы концентраций метана в соседних расчетных слоях), $F_{CH_{4,b}}$ — поток метана из донных отложений (с учетом

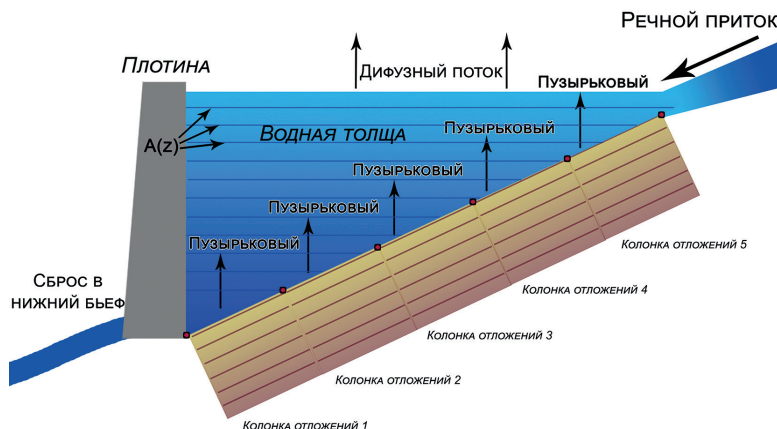


Рис. 3. Схема представления водной толщи и донных отложений в модели LAKE2.3. Синими линиями схематично показаны горизонтальные сечения водоема на расчетных уровнях модели, коричневыми столбцами изображены колонки донных отложений, расположенные на разных глубинах водоема

Fig. 3. Scheme of water body and bottom sediments presented in LAKE2.3 model. The blue lines schematically show the horizontal sections of the reservoir at the calculated levels of the model, the brown columns show the columns of bottom sediments located at different depths of the reservoir

площади примыкания каждой конкретной колонки грунтов к слою A_z см. рис. 3), B_{CH_4} — процессы, связанные с балансом «пузырька» и O_{CH_4} — окисление метана, рассчитываемое по кинетике Михаэлис-Ментен.

Система уравнений модели решается конечно-разностными методами.

Входные данные в модель подразделяются на гидрологическую (приток воды с крупными реками, уровень воды или водосброс через плотину) и метеорологическую (температура, влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, нисходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, осадки) информацию. Данные об уровне воды заимствовались из архива Можайской ГЭС, в качестве источника метеоданных использовался реанализ ERA5-Land. К этим данным вводилась корректировка по доступным рядам наземных наблюдений как на самом водохранилище, так и на ближайших метеорологических станциях [45].

Основной численный эксперимент с моделью LAKE проводился за период с 2015 по 2019 гг., при том, что период ноябрь — декабрь 2014 г. использовался в качестве периода взаимного приспособления переменных модели и адаптации к атмосферному воздействию. Шаг по времени модели — 10 с, шаг метеорологических данных — 1 ч, входная гидрологическая информация (расход притоков, уровень воды) — 1 сут, значения потока метана суммировались за каждый день. За начальные условия распределения температуры воды были приняты данные, полученные в ходе рейдовых наблюдений осенью 2014 г., относительное содержание кислорода в начальный момент задавалось 100 %, что справедливо для условий осенней гомотермии — однородного распределения температуры с глубиной. Начальная концентрация метана была задана 0, так как на тот момент времени соответствующих наблюдений не проводилось. В модели было задано 22 уровня по вертикали с шагом 1 м, что соответствует максимальной глубине водоема, 5 колонок донных отложений, равномерно распределенных по глубинам водоема, глубиной в 1 м каждая, шаг сетки внутри колонки — 10 см.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Оценка эмиссии метана по натурным наблюдениям

Годовой ход эмиссии метана на станции IV рассчитывается согласно описанным выше предположениям — отсутствие потока зимой, среднее значение для весеннего и осеннего периода, равное $2,4 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$, летом поток метана измерен инструментально в ходе рейдовых наблюдений, между которыми его значения линейно интерполировались. Подробнее о пространственно-временной изменчивости потоков метана в Можайском водохранилище в летний период описано в публикации [46].

Основываясь на временной изменчивости потоков метана на станции IV в зависимости от уровня режима и других факторов возможно рассчитать среднее значение потока с поверхности Можайского водохранилища. Между измерениями летом значения потока линейно интерполировались. После этого умножались на площадь Можайского водохранилища за каждый день, таким образом получая значение суточной эмиссии метана, сумма составляла годовой выброс метана с поверхности Можайского водохранилища. Выброс метана за 2017–2019 гг. составил $347 \text{ тС-CH}_4 \text{ год}^{-1}$, $265 \text{ тС-CH}_4 \text{ год}^{-1}$ и $389 \text{ тС-CH}_4 \text{ год}^{-1}$ соответственно. Средний удельный поток метана с поверхности Можайского водохранилища составил $34,4 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$.

3.2. Оценка эмиссии метана с помощью модели LAKE

Качество результатов модели оценивалось по 4 характеристикам — температура воды, растворенный в воде кислород, растворенный метан и потоки метана на границе «вода — атмосфера». Результаты расчета модели LAKE по этим параметрам сопоставлялись с рейдовыми наблюдениями, которые проводились в летние периоды 2016–2019 гг. на станции IV.

Результаты моделирования температуры воды сравнивались с данными измерений термокосы. Модель хорошо воспроизводит изменчивость температуры в верхнем перемешанном слое (рис. 4).

Температура на глубине 10 м воспроизводится хуже и сильно зависит от условий конкретного года. Наилучшие результаты получены для 2017 и 2016 гг., в то время как в 2018 и 2019 году в модели происходит более интенсивное перемешивание, не наблюдаемое в водоеме. Из-за этого придонные слои в модели прогреваются сильнее. Это связано с использованием в модели дополнительного коэффициента теплопроводности и диффузии в термоклине упрощенного вида, который не позволяет воспроизводить перемешивание в металимнионе (слой водной толщи с наибольшими градиентами характеристик по глубине при стратификации) одинаково хорошо при различном атмосферном воздействии.

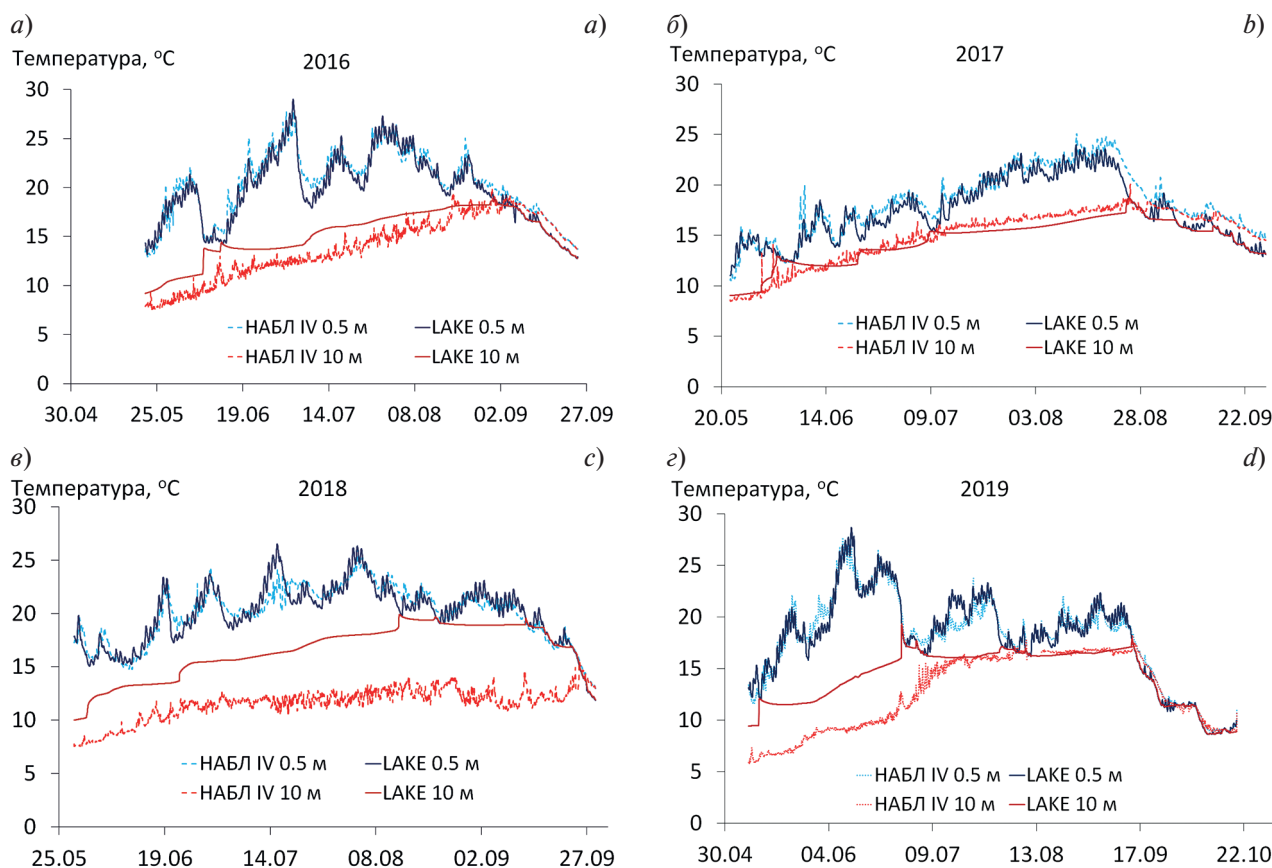


Рис. 4. Сопоставление изменчивости температуры воды в поверхностном горизонте и на глубине 10 м по результатам расчета модели и показаниям термокосы на станции IV за 2016–2019 гг. (a–d соответственно)

Fig. 4. Comparison of surface layer temperature and temperature on 10 m depth between model simulations results and temperature gauges at station IV for 2016–2019 (a–d respectively)

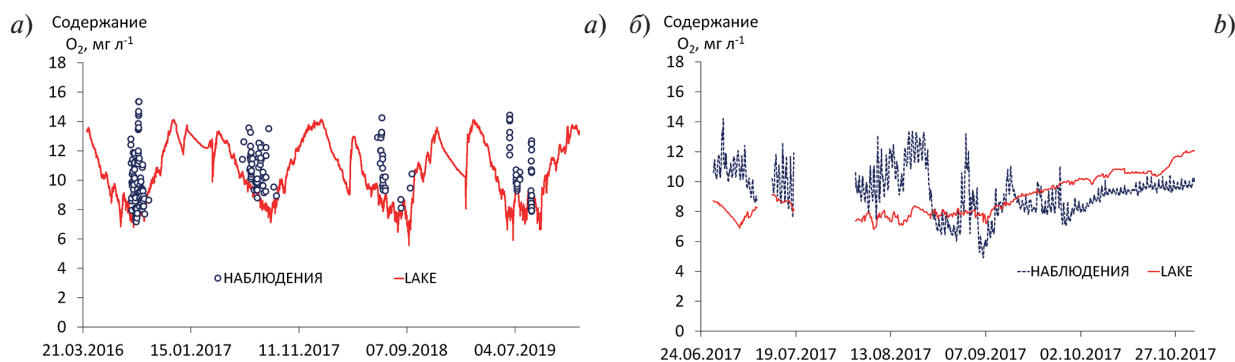


Рис. 5. Сопоставление временной изменчивости концентрации растворенного кислорода в поверхностном горизонте по результатам расчета модели и рейдовым наблюдениям на станции IV (а); показаниям самописцев кислорода в 2017 г. (б)

Fig. 5. Comparison of temporal variability of dissolved oxygen concentrations in surface layer between model simulation results and in situ measurements at station IV (a); between model simulation results and oxygen measurement gauge in 2017 (b)

В летние периоды, когда проводились наблюдения за содержанием растворенного кислорода, в воде концентрации значительно выше, чем рассчитанные по модели (рис. 5). Для расчета концентрации растворенного кислорода в модели LAKE используется адаптированная к одномерной модели суточно-осредненная схема параметризации процессов углеродного цикла Хансона [38], поэтому суточный цикл содержания O_2 в поверхностных горизонтах в модели воспроизводится с заниженной амплитудой. Систематическое занижение концентрации кислорода в перемешанном слое связано с тем, что в модели эта концентрация находится в близком равновесии с атмосферным содержанием. Малые отклонения от равновесного состояния объясняются приближенным равенством источников (фотосинтез) и стоков (разложение отмершей органики) в модельном эпилимнионе (верхнем хорошо перемешиваемом слое). В свою очередь, это может быть вызвано высокой скоростью окисления детрита, который не успевает покинуть перемешанный слой в ходе осаждения. В контексте же данного исследования, наиболее важно то, что для расчета скорости окисления метана в поверхностных горизонтах значительная разница в концентрации O_2 по модели и по наблюдениям не имеет значения, так как при таком насыщении кислорода деятельность метанотрофных микроорганизмов не лимитируется его недостатком (иными словами, и в модели, и в наблюдениях содержание кислорода в перемешанном слое значительно превышает константу полунасыщения, равную 0,33 мг/л, в уравнении Михаэлиса-Ментен).

Для процессов формирования потоков метана важной характеристикой является содержание кислорода в придонных горизонтах воды, особенно при образовании аноксидной зоны в гипolimнионе (придонный слой под температурным и плотностным скачком). При сопоставлении результатов модели и натурных наблюдений по концентрации растворенного кислорода у дна видно, что качество расчёта является удовлетворительным (рис. 6).

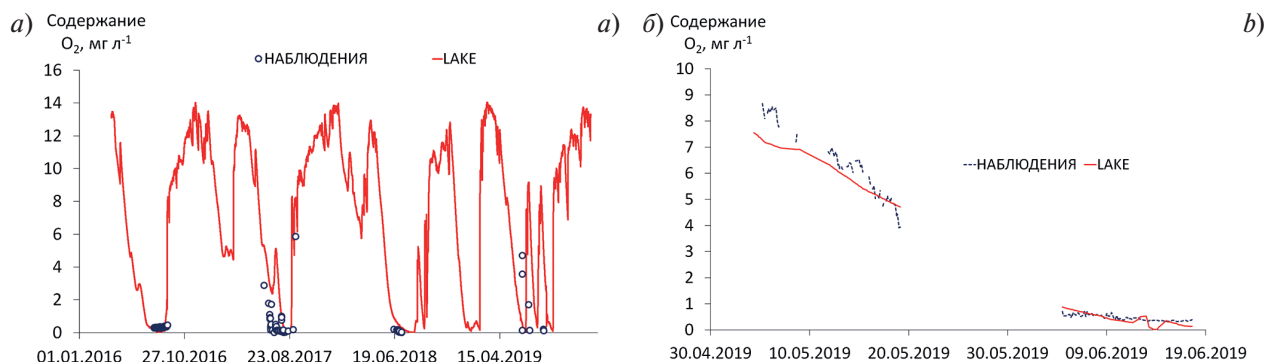


Рис. 6. Сопоставление временной изменчивости концентрации растворенного кислорода в придонном горизонте (около 13 м) по результатам расчета модели и рейдовым наблюдениям на станции IV (а); показаниям самописцев кислорода в 2019 г. (б)

Fig. 6. Comparison of temporal variability of dissolved oxygen concentrations in bottom layer (about 13 m) between model simulation results and in situ measurements at station IV (a); between model simulation results and oxygen measurement gauge in 2019 (b)

Модель хорошо воспроизводит процессы истощения запасов кислорода в придонной воде в течение летнего периода, что очень важно для накопления метана в гипolimнии.

При сравнении концентраций метана в поверхностном слое по модели и по натурным данным выявлено, что модель хорошо воспроизводит временную изменчивость концентрации, однако, завышает эти значения в среднем на 0,2–0,3 мкмоль/л, при этом данная ошибка характерна для всего периода. Сравнение концентрации метана в придонной воде по модели и по рейдовым наблюдениям показало, что в LAKE наблюдается рост концентрации метана у дна летом, как и по натурным наблюдениям, однако, интенсивность его накопления в модели значительно ниже, чем наблюдаемые *in situ* значения (рис. 7, б). При этом, сезонные максимумы концентрации совпадают по времени в модели и по наблюдениям. Для сравнения на рис. 7, б приведена изменчивость концентрации метана не только на глубине 14 м (глубина рейдовой вертикали), но и на нижнем слое модели — 22 м. Даже на самом глубоком горизонте в модели метан в гипolimнии аккумулируется меньше, чем в локальных наблюдениях.

Из графика 7 видно, что модель на данный момент плохо воспроизводит рост концентрации метана в придонных горизонтах. Однако без включения в расчетную схему динамической характеристики, связанной с изменением количества лабильного органического вещества в донных отложениях, получить наблюдаемые высокие концентрации достаточно сложно. В дальнейшем такой блок расчета будет включен в модель LAKE.

По результатам расчета модели был получен временной ход диффузного и пузырькового потоков метана (рис. 8).

Для оценки качества воспроизведения моделью временной изменчивости суммарного потока метана, было проведено сравнение полученных значений потока по многочисленным рейдовым наблюдениям на станции IV и суммы значений пузырькового потока со второй по глубине грунтовой колонки в модели (рис. 3) (так как она наиболее соответствует глубинам рейдовой вертикали) и среднего по поверхности водоёма диффузного потока (рис. 9).

Основная задача применения модели — это оценка годовой эмиссии, что предполагает качественное воспроизведение сезонно-осреднённых значений эмиссии, а также значительных выбросов метана, происходящих из-за перемешивания водной толщи при разрушении стратификации или перепадов гидростатического давления. Модель удовлетворительно воспроизводит как фоновые значения потока метана в летний период, так и разовые большие выбросы, что хорошо видно на примере 2018 и 2019 гг. — пики значений потока по наблюдениям соответствуют пикам по модели, однако, смещены по времени на 1–2 сут. Расчёт по модели менее успешен летом 2017 г. Поток метана в течение лета значительно увеличивался из-за накопления в грунтах свежего органического вещества. При этом в модели изменение генерации

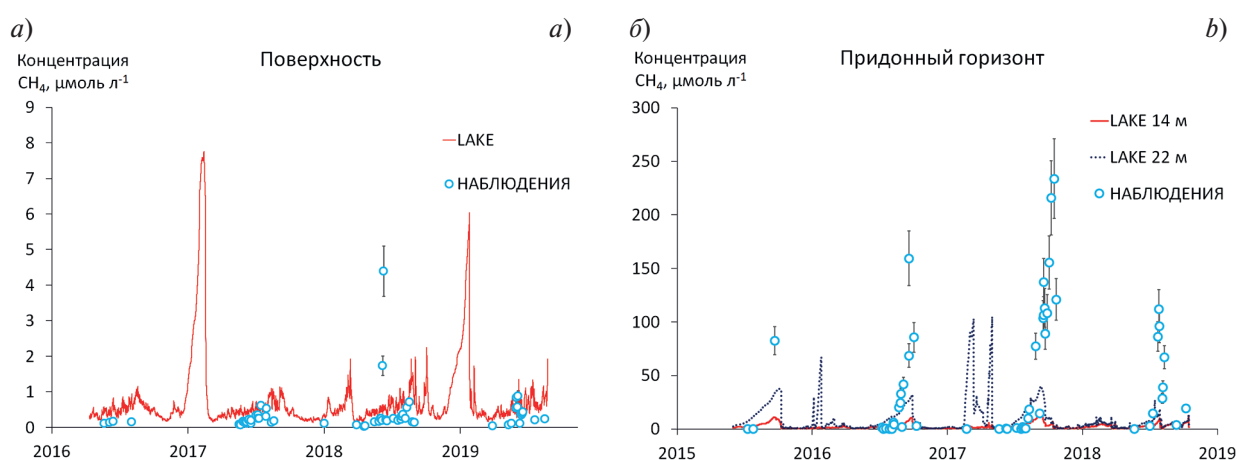


Рис. 7. Сопоставление изменчивости концентрации метана в воде в поверхностном горизонте (а) и на горизонтах 14 и 22 м (б) по результатам расчета модели и рейдовым наблюдениям на станции IV. Для наблюдений приведены значения с интервалами, соответствующими относительной ошибке определения концентрации метана 16 %

Fig. 7. Comparison of variability of methane concentrations in surface layer (a) and on depth 14 and 22 m (b) between model simulation results and *in situ* measurements at station IV. For *in situ* measurements intervals of relative errors (16 % for methane concentration) are shown

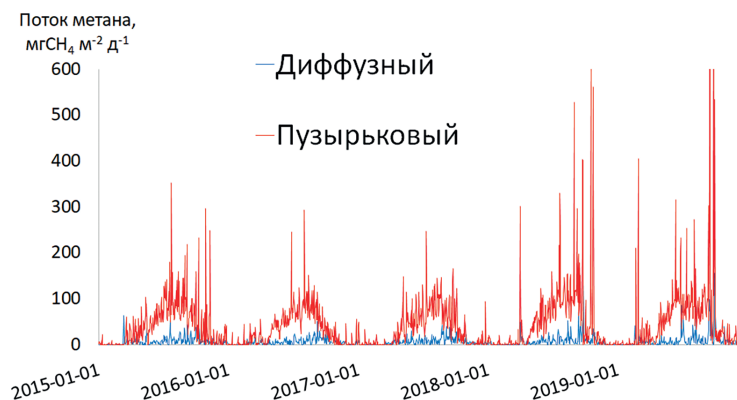


Рис. 8. Временная изменчивость двух основных составляющих потока метана (диффузного и пузырькового) в атмосферу за 2015–2019 гг. по результатам модели

Fig. 8. Temporal variability of two main components of methane flux (diffusive and ebullition) into the atmosphere in 2015–2019 by model simulation results

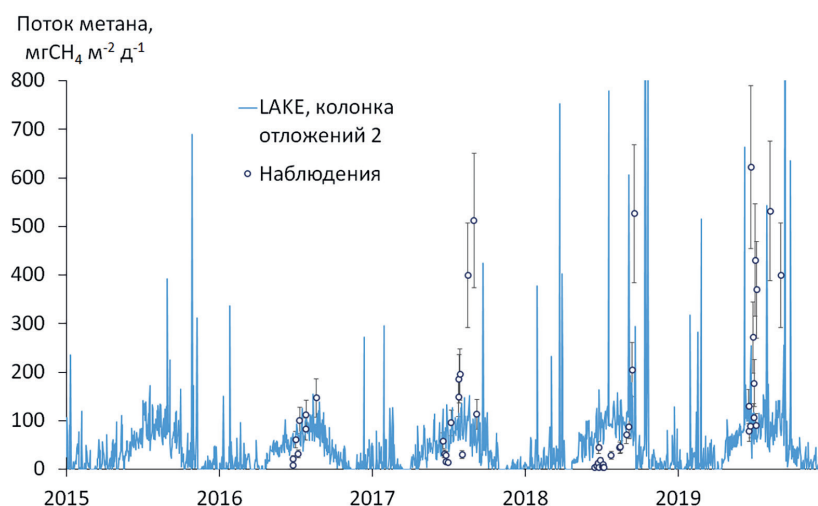


Рис. 9. Сопоставление значений общего потока метана за 2015–2019 гг. по расчету модели LAKE (вторая колонка) и по наблюдениям на рейдовой вертикали на Можайском водохранилище (станция IV). Для наблюдений приведены значения с интервалами, соответствующими относительной ошибке определения потока метана в атмосферу 27 %

Fig. 9. Comparison of total methane flux in 2015–2019 between LAKE model (column 2) and *in situ* measurements at station IV in Mozhaysk Reservoir. For *in situ* measurements intervals of relative errors (27 % for methane fluxes) are shown

метана в донных отложениях зависит только от температуры, изменение содержания органического вещества в донных отложениях не предусмотрено, и в 2017 г. этот фактор оказал наиболее значительное влияние на результаты расчетов. В дальнейшем планируется усовершенствовать модель в этой части, добавив переменное содержание органического вещества в донных отложениях и заменить константу генерации метана [9] на переменную, зависящую от содержания лабильного ОВ в грунтах.

Примечательно, что пересыщение кислородом в эпилимнионе может быть «предиктором» для резкого летнего роста эмиссии метана, т. к. это пересыщение свидетельствует о значительной первичной продукции и быстром удалении отмершей органики из перемешанного слоя, так что последняя, осаждаясь на дне, становится субстратом для метаногенов.

По данным основного расчета модели (рис. 8) была оценена эмиссия метана с Можайского водохранилища за 2015–2019 г. В табл. 2 представлены результаты оценки эмиссии с помощью модели LAKE и по натурным наблюдениям.

Значения, полученные двумя способами, достаточно близки, и средний поток метана из Можайского водохранилища за весь расчетный период составляет $34,4 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по натурным наблюдениям и $37,7 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по модели. Эти значения при сравнении с мировыми оценками относят Можайское водохранилище к верхней границе диапазона значений для водоемов умеренного пояса [7]. Однако, на данный момент описанные методы оценки имеют расхождения при сравнении отдельных лет между собой. Дальнейшее исследование этого вопроса позволит получить еще более точные оценки и применять метод моделирования для оценки эмиссии метана с менее изученных и неизученных водохранилищ, а также при различных сценариях будущего изменения климата.

Как и по данным натурных наблюдений, основной вклад в эмиссию метана по результатам моделирования составляет пузырьковая составляющая, которая особенно существенна при значительном общем потоке (рис. 8). Хорошо видна тенденция увеличения потока с весеннего периода к концу лета/началу осени со значительным выбросом перед фазой осенней конвекции, что также согласуется с натурными данными. В модели увеличение потока за теплый период связано в первую очередь с увеличением придонной температуры воды и донных отложений, в предположении, что продукция метана определяется интенсивностью микробиологических процессов, напрямую зависящих от температурного режима.

Помимо значительно большего вклада в общую эмиссию, пузырьковый поток имеет намного более значительную амплитуду колебаний в течение всего года, в сравнении с другими видами потока. Связано это с чувствительностью пузырькового потока в модели к динамике гидростатического давления, которое представляется собой сумму атмосферного давления и веса столба воды. Это хорошо видно по результатам численного эксперимента, в котором во входных данных атмосферное давление задавалось константой = 993 гПа — среднее значение атмосферного давления за расчетный период (рис. 10, б).

Таблица 2

Table 2

Оценка эмиссия метана из Можайского водохранилища по результатам расчета модели LAKE и по натурным данным

Methane emission estimation from Mozhaysk Reservoir by LAKE model simulations and by *in situ* observations

Год	Эмиссия, тС по модели LAKE	Эмиссия, тС по натурным данным
2015	338	
2016	315	
2017	325	347
2018	414	265
2019	415	389

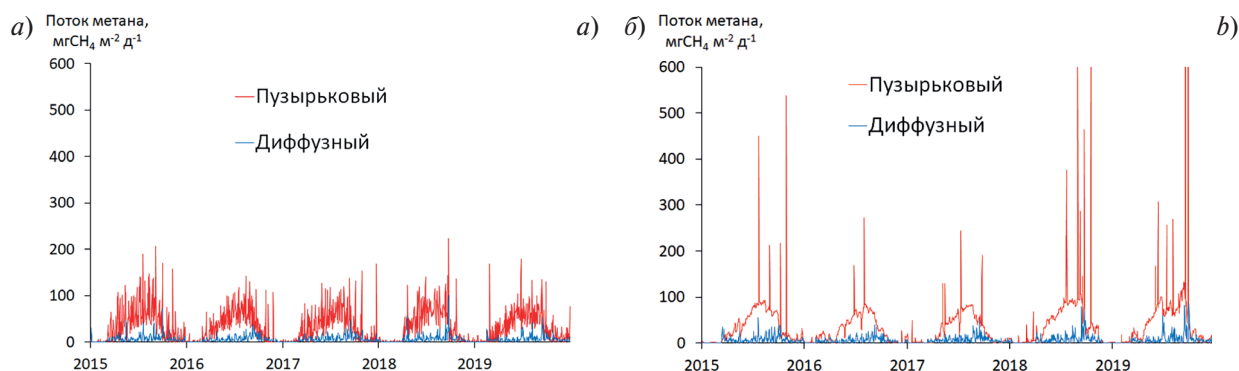


Рис. 10. Временная изменчивость потока метана в атмосферу с Можайского водохранилища с 2015 по 2019 г. по результатам моделирования при постоянном уровне воды (а), при задании атмосферного давления постоянным значением = 993 гПа (б)

Fig. 10. Temporal variability of methane flux into the atmosphere from Mozhaysk Reservoir in 2015–2019 by model simulations with constant water level (a), with constant atmospheric pressure = 993 hPa (b)

При таких условиях амплитуда колебаний пузырькового потока сильно уменьшилась, и во временном ходе остались только крупные выбросы, связанные с понижением уровня воды, а также постепенный рост потока в течение теплого периода, за счет повышения температуры донных отложений. Возникновение наиболее крупных выбросов метана в атмосферу по причине резких изменений уровня подтверждается экспериментом с моделью, в котором задавался постоянный уровень и водный баланс не учитывался (рис. 10, а). Также были отключены приток и сток тепла с речными водами, приток метана, кислорода и других физических и химических характеристик воды.

В результатах данного расчета максимальных выбросов, достигающих в основном эксперименте 500–600 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, не наблюдается. Стоит отметить, что диффузный поток метана в атмосферу в обоих экспериментах практически не изменился. В табл. 3 приведены значения годовой эмиссии метана по результатам приведенных расчетов.

Были проведены эксперименты по оценке чувствительности модели к изменению максимальной потенциальной скорости реакции окисления метана для более точного воспроизведения его поверхностной концентрации, что важно для корректного воспроизведения диффузного потока в атмосферу (рис. 11, а). Результаты расчета модели, в котором максимальная потенциальная скорость реакции была увеличена в два раза с 0,1 моль/сут до 0,2 моль/сут, показали, что этот параметр является эффективным калибровочным параметром для приближения концентрации растворенного метана в эпилимнионе к наблюдаемым значениям.

Важным параметром, регулирующим значения пузырькового потока в модели через степень перенасыщения метана в донных отложениях — это параметр температурной зависимости генерации метана q_{10} , принимаемый обычно равным 2 [47]. В основном расчёте модели применялось значение данного параметра, равное 2.1, в дополнительном эксперименте он был принят за 3, что также соответствует используемым в литературе данным [47] (рис. 11, б).

Таблица 3
Table 3

Эмиссия метана с Можайского водохранилища по результатам экспериментов с давлением и уровнем воды
Methane emission from Mozhaysk Reservoir by results of the experiments with pressure and water level

Год	Эмиссия, тС давление = 993 ГПа	Эмиссия, тС постоянный уровень
2015	355	341
2016	275	297
2017	288	309
2018	410	312
2019	459	305

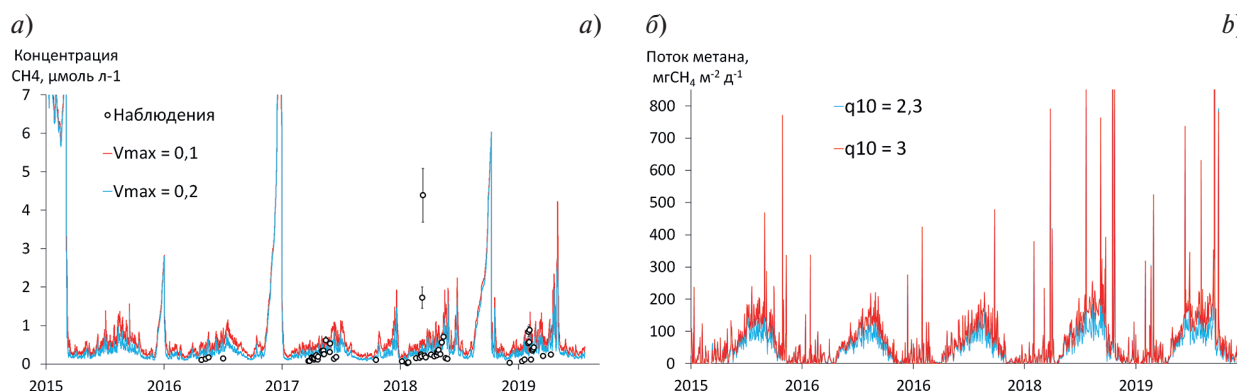


Рис. 11. Результаты численного эксперимента с моделью при увеличении максимальной потенциальной скорости реакции окисления метана в два раза (с 0,1 моль/сут до 0,2 моль/сут) (а) и с различными значениями параметра температурной зависимости генерации метана в грунтах q_{10} ; 1 — $q_{10} = 2,1$; 2 — $q_{10} = 3$ (б)

Fig. 11. Results of numerical experiment with the model with doubled potential rate of methane oxidation reaction (from 0.1 mol per day to 0.2 mol per day) (a) and with different values of methane generation parameter q_{10} ; 1 — $q_{10} = 2.1$; 2 — $q_{10} = 3$ (b)

Таблица 4

Table 4

Эмиссия метана с Можайского водохранилища по результатам экспериментов
 с изменением потенциальной скорости окисления метана и параметра генерации метана q_{10}
 Methane emission from Mozhaysk Reservoir by the experiments results with various potential oxidation rate
 and methane generation parameter q_{10}

Год	Эмиссия, тС $V_{\max} = 0,2$	Эмиссия, тС $q_{10} = 3$
2015	318	443
2016	296	447
2017	306	430
2018	394	555
2019	393	528

Так как основной вклад в общую эмиссию метана вносит именно пузырьковый поток, при увеличении данного параметра значительно изменяется и общая эмиссия метана в атмосферу. Таким образом, оптимизация модели по параметру q_{10} позволяет эффективно корректировать пузырьковый и общий поток метана в атмосферу при наличии данных измерений. Результаты расчета годовых эмиссий метана из Можайского водохранилища по результатам этих экспериментов приведены в табл. 4.

4. Заключение

Сравнение результатов модели с данными наблюдений показало, что модель относительно хорошо воспроизводит температурный режим водохранилища. Температура придонных горизонтов воды воспроизводится несколько хуже, чем температура эпилимниона, что связано со сложностью параметризации вертикального переноса тепла в одномерной модели при устойчивой стратификации. Содержание растворенного кислорода в придонных горизонтах (очень важной характеристики при расчете накопления метана в гипolimнионе) по результатам моделирования очень близко к данным, полученным инструментально.

Оценки суммарной годовой эмиссии метана с Можайского водохранилища по натурным данным и по расчетам модели LAKE близки. Средний поток за период моделирования составил $34,4 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по натурным наблюдениям и $37,7 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по модели. Такая сходимость результатов достигнута калибровкой параметров: максимальная потенциальная скорость реакции окисления метана (эффективный способ регулирования диффузного потока) и параметр генерации метана q_{10} (эффективный способ регулирования пузырькового потока). Наибольший вклад в общий поток метана вносит пузырьковая составляющая, в летний период пузырьковый поток достигает 95 % от общего потока.

Применённый в настоящей работе подход при дальнейшем совершенствовании модели LAKE, позволит использовать её на других водных объектах, основываясь на тех ключевых параметрах, которые были выявлены в ходе численного воспроизведения потоков на Можайском водохранилище. На менее изученных водных объектах будет возможно акцентировать внимание в исследовании именно на наиболее важные для точного воспроизведения потоков метана аспекты. Проведенные численные эксперименты позволяют определить основные параметры модели, необходимые для реалистичного воспроизведения потоков метана на границе «вода — атмосфера» и корректной оценки годовой эмиссии с искусственных водоемов.

Финансирование

Настоящая работа частично поддержана Министерством высшего образования и науки России (договор № 075–15–2019–1621) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (договор № МД–1850.2020.5).

Funding

This work was partially supported by the Ministry of Higher Education and Science of Russia (agreement No. 075–15–2019–1621) and the Grants Council of the President of the Russian Federation (agreement No. MD-1850.2020.5).

Литература

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T. et. al. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing // *Asses. Report of the IPCC*. 2007. Chapter 2. P. 129–217.
2. IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 01.12.2021).
3. Sanuoi M. et. al. The global methane budget 2000–2012 // *Earth System Science Data*. 2016. Vol. 8. P. 697–751. doi:10.5194/essd-8-697-2016
4. Deemer B. et.al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis // *BioScience*. 2016. Vol. 66, N 11. P. 949–964. doi:10.1093/biosci/biw117
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21. P. 13636–13641. doi:10.1007/s11356-014-3165-4
6. Louis V. et.al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // *BioScience*. 2000. Vol. 50. P. 766–775. doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0766: RSASOG]2.0.CO;2
7. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A global assessment. Berlin: Springer, 2012. 410 p.
8. Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse gas emissions — fluxes and processes. Berlin: Springer, 2005. 732 p.
9. Stepanenko V. et. al. LAKE2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9, N 5. P. 1977–2006. doi:10.5194/gmd-9-1977-2016
10. Stepanenko V., Valerio G., Pilotti M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models // *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2020. Vol. 12. P.e21063. doi:10.1029/2019MS001906
11. Stepanenko V., Machul'skaya E., Glagolev M., Lykosov V. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone // *Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47, N 2. P. 252–264. doi:10.1134/S0001433811020113
12. Tan Z., Zhuang Q., Anthony K. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study // *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2015. Vol. 7. P. 459–483. doi:10.1002/2014MS000344
13. Tan Z., Zhuang Q. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10, N5. P. 054016. doi:10.1088/1748-9326/10/5/054016
14. Guseva S., Stepanenko V., Shurpali N., Marushchak M. et. al. Numerical simulation of methane emission from subarctic lake in Komi republic (Russia) // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016, 2, 9, 58–74. doi:10.24057/2071-9388-2016-9-2-11-20
15. Tan Z., Zhuang Q., Shurpali N., Marushchak M. et. al. Modeling CO₂ emissions from Arctic lakes: Model development and site-level study // *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2017. Vol. 9, N 5. P. 2190–2213. doi: org/10.1002/2017MS001028
16. Kiuru P., Ojala A., Mammarella I., Heiskanen J. et. al. Effects of climate change on CO₂ concentration and efflux in a humic boreal lake: A modeling study // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018. Vol. 123, N 7. P. 2212–2233. doi:10.1029/2018JG004585
17. Guseva S., Bleninger T., Jöhnk K., Polli B. et. al. Multimodel simulation of vertical gas transfer in a temperate lake // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 24. P. 697–715. doi:10.5194/hess-24-697-2020
18. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J. Methane and carbon dioxide in the sediment of a eutrophic reservoir: Production pathways and diffusion fluxes at the sediment–water interface // *Water Air & Soil Pollution*. 2015. Vol. 226. P. 16–32. doi:10.1007/s11270-014-2268-3
19. Bazhin N. Methane emission from bottom sediments // *Chemistry for Sustainable Development*. 2003. Vol. 11. P. 577–580.
20. Gash J. (main edit.) Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs // *World Bank Report*. 2010. UNESCO/IHA GHG Proj. P. 166.
21. Borrel G., Jezequel D., Bidderre-Petit C., Morel-Desrosiers N. et. al. Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems // *Research Microbiology*. 2011. Vol. 162. P. 832–847. doi:10.1016/j.resmic.2011.06.004
22. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007. Vol. 112. P. 3006–3020. doi:10.1029/2006JG000393
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008. Vol. 113. P. 2024–2037. doi:10.1029/2007JG000608
24. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 48–58.

25. Ostrovsky I., McGinnis D., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2008. Vol. 6. P. 105–118. doi:10.4319/lom.2008.6.105
26. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission // *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51, N3. P. 1267–1277. doi:10.1021/acs.est.6b03185
27. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions // *Environmental Management*. 2017. Vol. 60. P. 1–15. doi:10.1007/s00267-017-0909-1
28. Beaulieu J., DelSontro T., Downing J. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. P. 1375–1380. doi:10.1038/s41467-019-09100-5
29. Bartosiewicz M., Pytulska A., Laurion I., Maranger R. Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake // *Water Research*. 2021. Vol. 196. P. 116985. doi:10.1016/j.watres.2021.116985
30. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // *Inland Waters*. 2016. Vol. 6. P. 295–302. doi:10.1080/IW-6.3.980
31. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.
32. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. P. 5450–5455. doi:10.1021/es1005048
33. Iakunin M., et. al. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in western Europe using the LAKE2.0 model // *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13, N 8. P. 3475–3488. doi:10.5194/gmd-13-3475-2020
34. Businger J., Wyngaard J., Izumi Y., Bradley E. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1971. Vol. 28, N 2. P. 181–189.
35. Paulson C. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer // *Journal of Applied Meteorology*. 1970. Vol. 9, N 6. P. 857–861.
36. McGinnis D., et. al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, N C9. doi:10.1029/2005JC003183
37. Stefan H., Fang X. Dissolved oxygen model for regional lake analysis // *Ecological Modelling*. 1994. Vol. 71, N 1–3. P. 37–68.
38. Hanson P. et. al. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes // *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10, N 8. P. 1285–1298. doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00805.x
39. Sadeghian A. et. al. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios // *Environmental Modelling & Software*. 2018. Vol. 101. P. 73–85. doi:10.1016/j.envsoft.2017.12.009
40. Fichot C., Miller W. An approach to quantify depth-resolved marine photochemical fluxes using remote sensing: Application to carbon monoxide (CO) photoproduction // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, N 7. P. 1363–1377. doi:10.1016/j.rse.2010.01.019
41. Koehler B. et. al. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters // *Global Biogeochemical Cycles*. 2014. Vol. 28, N 7. P. 696–711. doi:10.1002/2014GB004850
42. Walker R., Snodgrass W. Model for sediment oxygen demand in lakes // *Journal of Environmental Engineering*. 1986. Vol. 112, N 1. P. 25–43. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:1(25)
43. Donelan M., Wanninkhof R. Gas transfer at water surfaces — concepts and issues // *Geophysical Monograph Series*. 2002. Vol. 127. P. 1–10. doi:10.1029/GM127p0001
44. Степаненко В.М., Репина И.А., Ганбат Г., Даваа Г. Моделирование ледового режима соленых озер // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 1. С. 152–163. doi:10.31857/S0002-3515551152-163
45. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling // *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science*. 2020. Vol. 611. P. 12–29. doi:10.1088/1755-1315/611/1/012029
46. Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the mozhaysk reservoir in summer period // *E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference*. 2020. Vol. 163. P. 03010. doi:10.1051/e3sconf/202016303010
47. Liikanen A., Murtoniemi T., Tanskanen H., Tero V. et. al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake // *Biogeochemistry*. 2002. Vol. 59, N 3. P. 269–286. doi:10.1023/A%3A1016015526712

References

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T. et. al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Asses. Report of the IPCC*. 2007, Chapter 2, 129–217.
2. IPCC. The intergovernmental panel on climate change. URL: <https://www.ipcc.ch> (date of access: 01.12.2021).
3. Sanuoi M., Biusquet P., Poulter B., Peregon A. et. al. The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*. 2016, 8, 697–751. doi:10.5194/essd-8-697-2016
4. Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J. et. al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. *BioScience*. 2016, 66, 11, 949–964. doi:10.1093/biosci/biw117
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014, 21, 13636–13641. doi:10.1007/s11356-014-3165-4
6. Louis V., Kelly C., Duchemin E., Rudd J. et. al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *BioScience*. 2000, 50, 766–775. doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0766: RSASOG]2.0.CO;2
7. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A global assessment. *Berlin, Springer*, 2012. 410 p.
8. Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse gas emissions — fluxes and processes. *Berlin, Springer*. 2005. 732 p.
9. Stepanenko V. et.al. LAKE2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9, 5, 1977–2006. doi:10.5194/gmd-9-1977-2016
10. Stepanenko V., Valerio G., Pilotti M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2020, 12, e21063. doi:10.1029/2019MS001906
11. Stepanenko V., Machul'skaya E., Glagolev M., Lykosov V. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011, 47, 2, 252–264. doi:10.1134/S0001433811020113
12. Tan Z., Zhuang Q., Anthony K. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2015, 7, 459–483. doi:10.1002/2014MS000344
13. Tan Z., Zhuang Q. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions. *Environmental Research Letters*. 2015, 10, 5, 054016. doi:10.1088/1748-9326/10/5/054016
14. Guseva S., Stepanenko V., Shurpali N., Marushchak M. et.al. Numerical simulation of methane emission from subarctic lake in Komi republic (Russia). *Geography, Environment, Sustainability*. 2016, 2, 9, 58–74. doi:10.24057/2071-9388-2016-9-2-11-20
15. Tan Z., Zhuang Q., Shurpali N., Marushchak M. et. al. Modeling CO₂ emissions from Arctic lakes: Model development and site-level study. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2017, 9, 5, 2190–2213. doi:10.1002/2017MS001028
16. Kiuru P., Ojala A., Mammarella I., Heiskanen J. et. al. Effects of climate change on CO₂ concentration and efflux in a humic boreal lake: A modeling study. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018, 123, 7, 2212–2233. doi:10.1029/2018JG004585
17. Guseva S., Bleninger T., Jöhnk K., Polli B. et. al. Multimodel simulation of vertical gas transfer in a temperate lake. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020, 24, 697–715. doi:10.5194/hess-24-697-2020
18. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J. Methane and carbon dioxide in the sediment of a eutrophic reservoir: Production pathways and diffusion fluxes at the sediment–water interface. *Water Air & Soil Pollution*. 2015, 226, 16–32. doi:10.1007/s11270-014-2268-3
19. Bazhin N. Methane emission from bottom sediments. *Chemistry for Sustainable Development*. 2003, 11, 577–580.
20. Gash J. (main edit.) Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs. *World Bank Report*. 2010, UNESCO/IHA GHG Proj. P. 166.
21. Borrel G., Jezequel D., Bidderre-Petit C., Morel-Desrosiers N. et. al. Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems. *Research Microbiology*. 2011, 162, 832–847. doi:10.1016/j.resmic.2011.06.004
22. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007, 112, 3006–3020. doi:10.1029/2006JG000393
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008, 113, 2024–2037. doi:10.1029/2007JG000608
24. Garkusha D., Fedorova A., Tambieva N. Computing the methane cycle elements in the Aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulae. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016, 41, 6, 410–417. doi:10.3103/S1068373916060054
25. Ostrovsky I., McGinnis D., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2008, 6, 105–118. doi:10.4319/lom.2008.6.105

26. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission. *Environmental Science & Technology*. 2017, 51, 3, 1267–1277. doi:10.1021/acs.est.6b03185
27. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions. *Environmental Management*. 2017, 60, 1–15. doi:10.1007/s00267-017-0909-1
28. Beaulieu J., DelSontro T., Downing J. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*. 2019, 10, 1375–1380. doi:10.1038/s41467-019-09100-5
29. Bartosiewicz M., Pytulska A., Laurion I., Maranger R. Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake. *Water Research*. 2021, 196, doi:10.1016/j.watres.2021.116985
30. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin. *Inland Waters*. 2016, 6, 295–302. doi:10.1080/IW-6.3.980
31. Edelshtein K. Hydrology of lakes and reservoirs. M., “Pero” publishing, 2014. 399 p. (in Russian).
32. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science & Technology*. 2010, 44, 5450–5455. doi:10.1021/es1005048
33. Iakunin M., Stepanenko V., Salgado R., Potes M. et. al. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in western Europe using the LAKE2.0 model. *Geoscientific Model Development*. 2020, 13, 8, 3475–3488. doi.org/10.5194/gmd-13-3475-2020
34. Businger J., Wyngaard J., Izumi Y., Bradley E. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1971, 28, 2, 181–189.
35. Paulson C. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*. 1970, 9, 6, 857–861.
36. McGinnis D., Greinert J., Artemov Y., Beaubien E., et.al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006, 111, C9. doi.org/10.1029/2005JC003183
37. Stefan H., Fang X. Dissolved oxygen model for regional lake analysis. *Ecological Modelling*. 1994, 71, 1–3, 37–68.
38. Hanson P., Pollard A., Bade D., Predick K. et. al. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. *Global Change Biology*. 2004, 10, 8, 1285–1298. doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00805.x
39. Sadeghian A., Chapra S., Hudson J., Wheeler H. et. al. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios. *Environmental Modelling & Software*. 2018, 101, 73–85. doi:10.1016/j.envsoft.2017.12.009
40. Fichot C., Miller W. An approach to quantify depth-resolved marine photochemical fluxes using remote sensing: Application to carbon monoxide (CO) photoproduction. *Remote Sensing of Environment*. 2010, 114, 7, 1363–1377. doi:10.1016/j.rse.2010.01.019
41. Koehler B., Landelius T., Weyhenmeyer G., Machida N. et. al. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters. *Global Biogeochemical Cycles*. 2014, 28, 7, 696–711. doi:10.1002/2014GB004850
42. Walker R., Snodgrass W. Model for sediment oxygen demand in lakes. *Journal of Environmental Engineering*. 1986, 112, 1, 25–43. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:1(25)
43. Donelan M., Wanninkhof R. Gas transfer at water surfaces — concepts and issues. *Geophysical Monograph Series*. 2002, 127, 1–10. doi:10.1029/GM127p0001
44. Stepanenko V., Repina I., Ganbat G., Davaa G. Numerical simulation of ice cover of saline lakes. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019, 55, 1, 129–138. doi:10.1134/S0001433819010092
45. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling. *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science*. 2020, 611, 12–29. doi:10.1088/1755-1315/611/1/012029
46. Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk Reservoir in summer period. *E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference*. 2020, 163, 03010. doi:10.1051/e3sconf/202016303010
47. Liikanen A., Murtoniemi T., Tanskanen H., Tero V. et. al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake. *Biogeochemistry*. 2002, 59, 3, 269–286. doi:10.1023/A%3A1016015526712

Об авторах

СТЕПАНЕНКО Виктор Михайлович, РИНЦ AuthorID: 128281, Scopus AuthorID: 12808698000,
e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

ЛОМОВ Виктор Александрович, РИНЦ AuthorID: 1067937, Scopus AuthorID: 57211208174,
e-mail: lomson620@mail.ru

ГРЕЧУШНИКОВА Мария Георгиевна, РИНЦ AuthorID: 68381, Scopus AuthorID: 6507726807

УДК 627.52

© A. S. Anshakov*, 2022

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia

*anshakov.aleks.xx@yandex.ru

MODELING OF HYDRODYNAMIC AND LITHODYNAMIC COASTAL PROCESSES IN THE HARBOUR AREA

Received 27.04.2022, Revised 05.07.2022, Accepted 18.10.2022

Abstract

One of the problems in the design of ports is the assessment of coastal sediment movements near structures. The article presents materials for assessing the impact of port facilities on the processes of coastal erosion/accumulations in the area of Gelendzhik Bay (Black Sea). All the main processes of interaction of waves, currents and sediment movement occur in the coastal zone, therefore, the study presents the possibilities of complex application of hydrodynamic and lithodynamic models. In this work, the wind wave models Wave Watch III and SWAN were used. As the initial data, the data of the NCEP/NCAR reanalysis of wind fields in the period from 1989 to 2012 were used. To simulate currents, sediment transport and lithodynamic processes, a model of two-dimensional COASTOX–CUR currents generated by waves and wind, COASTOX–SED sediment transport together with the COASTOX–MORPHO bottom reshaping model was used. In the simulation scenario, a sequence of the 5 strongest storms from the period under consideration was considered. Analysis of washout zones/accumulations have shown that areas of intensive bottom reshaping are associated with the most intense currents. It is shown that the construction of the port facilities will not have a significant impact on the lithodynamic processes in the Gelendzhik bay.

Keywords: Port facilities, Black Sea, Gelendzhik Bay, numerical modeling, waves, current, lithodynamic processes

© A. С. Аншаков*, 2022

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Россия

*anshakov.aleks.xx@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНЕ МОРСКОГО ПОРТА

Статья поступила в редакцию 27.04.2022, после доработки 05.07.2022, принята в печать 18.10.2022

Аннотация

Одной из проблем при проектировании портов является оценка перемещений береговых наносов вблизи сооружений. В статье приведены материалы оценки влияния сооружений порта на процессы береговой эрозии/аккумуляции в районе бухты Геленджик (Черное море). Все основные процессы взаимодействия волн, течений и движения наносов происходят в прибрежной зоне, поэтому в исследовании представлены возможности комплексного применения гидродинамических и литодинамических моделей. В данной работе использовались модели ветрового волнения Wave Watch III и SWAN. В качестве исходных данных использовались данные реанализа NCEP/NCAR полей ветра в период с 1989 по 2012 г. Для моделирования течений, переноса наносов и литодинамических процессов использовалась модель генерируемых волнами и ветром двумерных течений COASTOX–CUR, транспорта наносов COASTOX–SED совместно с моделью переформирования дна COASTOX–MORPHO. В сценарии моделирования рассматривалась последовательность 5-ти самых сильных штормов из рассматриваемого периода. Анализ зон размывов/аккумуляции показал, что участки интенсивного переформирования дна связаны с наиболее интенсивными течениями. Показано, что строительство сооружений порта не окажет существенного влияния на литодинамические процессы в Геленджикской бухте.

Ключевые слова: сооружения порта, Черное море, Геленджикская бухта, численное моделирование, волны, течения, литодинамические процессы

Ссылка для цитирования: Аншаков А.С. Моделирование гидродинамических и литодинамических береговых процессов в районе морского порта // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 101–108. doi:10.48612/fpg/xhaz-46hz-kk62

For citation: Anshakov A.S. Modeling of Hydrodynamic and Lithodynamic Coastal Processes in the Harbour Area. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 101–108. doi:10.48612/fpg/xhaz-46hz-kk62

1. Introduction

Assessment of the impact of seaport construction in the Gelendzhik Bay on currents and associated sediment transport distribution is included in a set of necessary measures to study the impact of this construction on coastal processes in the bay. Usually such estimates are made on the basis of observations of lithodynamic processes in the design area [1], but there are studies performed on the basis of numerical modeling [2]. Comprehensive numerical modeling of wind waves, hydrodynamics, sediment transport and lithodynamics provides the basis for conducting such a study. The key consideration was to compare changes in bottom bathymetry after series of design storms in today's conditions and after construction of port facilities.

The area of the projected port is located in Gelendzhik Bay on the northeastern shore of the Black Sea. Gelendzhik Bay juts into the shore for 3 km between Cape Tonkyy and Cape Tolstyy (Fig. 1). The depth at the entrance to the bay reaches 18 m, in the center of the bay — about 10 m and gradually decreases towards the shores. The shore of the bay in the construction area is abrasive, the height of the abrasive ledge is 1.5–2.0 m, and near the entrance capes the shores are rocky. There are practically no natural beaches (their width does not exceed 2 m).

Wind waves were modeled using the Wave Watch III and SWAN models [1–3]. To simulate currents, sediment transport and lithodynamics, we used the COASTOX–CUR model of two-dimensional currents generated by waves and wind, COASTOX–SED sediment transport together with the COASTOX–MORPHO seabed reshaping model [4–7].

2. Methods

Wave fields inside the Gelendzhik Bay, necessary for modeling currents and seabed reshaping, were calculated by the Wave Watch III (deep-water zone) and SWAN (coastal zone) models based on the NCEP/NCAR [8–10] reanalysis of wind fields in the period from 1989 to 2012. The same unstructured grids were used to model wind waves, as for lithodynamic modeling. Thus, errors arising from re-interpolation of fields from one grid to another were excluded.

COASTOX–CUR is a model for modeling of coastal currents generated under joint impact of wind, gradient currents of the deep-water zone, tides and wind waves. The numerical module solves two-dimensional shallow water equations using the finite volume method on unstructured grids, which include terms describing the effects of bottom friction, wave radiation stresses, and horizontal turbulent mixing. Due to the universal structure of model equations, they can, in addition to coastal currents, by appropriate boundary conditions and switched off function of



Fig. 1. Satellite image of the Gelendzhik Bay

wave radiation stresses, describe various long-wave processes — river currents, transformation of tidal waves, storm surges, tsunami waves. Algorithms for parallelizing computations on multiprocessor and/or multicore systems are also implemented.

The COASTOX current module is based on a two-dimensional system of equations time-averaged on scales significantly exceeding the period of “short” waves (storm waves, swell), in the long-wave (hydrostatic) approximation. These equations explicitly describe the tides and water level fluctuations associated with wind surges. The effect of short waves on currents and changes in the mean level is parameterized in the equations by wave stresses. The corresponding system of equations, in which the time-averaged currents in the coastal zone are determined by the balance between the wind shear stress τ_w , the bottom shear stress τ_b , the vertical averaged turbulent horizontal exchange tensor T_{ij} , the radiation stress tensor S_{ij} , and the force due to the free surface elevation gradient $\partial \xi / \partial x_i$, has the following form:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j q_i) + g h \frac{\partial \xi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_j \frac{\partial q_i}{\partial x_j} \right) - \tau_{bi} + \tau_{wi} + \tau_{si}, \quad (2)$$

where t — time, x_i — spatial coordinates, $h = \xi - \zeta$ — flow depth, u_i — current speed in i -direction; q_i — discharge in i -direction; $\zeta(x, y, t)$ — function of water surface; g — acceleration of gravity; τ_{si} — wave stress in i -direction; τ_{wi} — surface wind shear stress; D_j — horizontal turbulent viscosity coefficient (is a function of wave characteristics).

The bottom shear stress consists of two components. The first is determined by the quasi-stationary flow, and the other — by the bottom orbital motion of water particles induced by waves. After averaging of the bottom stress over the wave period, we obtain the following formula for the bottom stress due to the action of waves and currents:

$$\tau_{b1} = c_b \left\{ \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos^2 \alpha \right) u_1 + \left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \sin \alpha \cos \alpha \right) u_2 \right\}, \quad (3)$$

$$\tau_{b2} = c_b \left\{ \left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \sin \alpha \cos \alpha \right) u_1 + \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \sin^2 \alpha \right) u_2 \right\}, \quad (4)$$

where α — direction of wave propagation to coastline relatively to coordinate line x_1 .

$$U_{wc} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \omega_b^2 + 2(u_1 \cos \alpha + u_2 \sin \alpha) \omega_b} + \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \omega_b^2 - 2(u_1 \cos \alpha + u_2 \sin \alpha) \omega_b} \right\}, \quad (5)$$

$$\omega_b = \frac{\sigma H_w}{\pi \sinh[kh]}. \quad (6)$$

Here σ — wave angular frequency; H_w — wave height; k — wave number.

Wave stresses can be calculated by the formula:

$$\tau_{si} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j}, \quad (7)$$

where S_{ij} — wave-generated radiation stresses. At depths less than 0.35 m, radiation stresses are given by the ratio:

$$\tau'_s = \tau_s \frac{h}{0.35}. \quad (8)$$

The COASTOX-SED model is based on the numerical solution of the equations of advective-diffusion sediment transport by the finite volume method. The local intensity of sedimentation and erosion processes is taken to be proportional to the difference between the instantaneous and equilibrium sediment concentration in each grid node. To calculate this intensity, set of known formulas of the modern theory of coastal sediment transport is used. At the same time, the Van Rijn formulation [11–13] is recommended as the main one for non-cohesive sandy sediments and fractions close to them in size, and the Camenen-Larsen [14] formulation is recommended for pebble sediments.

The COASTOX-MORPHO model is based on a two-dimensional equation of the mass balance of seabed sediments in the coastal zone (Exner's equation), which is numerically implemented on the same computational grid as the COASTOX-CUR and COASTOX-SED models.

The wind wave modeling was carried out on four nested rectangular grids. The first grid covered the entire Black Sea, the number of grid nodes was 288×117 , the grid cell size was 3 minutes, or approximately 5.5 km. The second grid covered the North-Eastern part of the Black Sea — 267×169 points, cell size — 0.6 min or 1.1 km. The third grid covers the coastal zone of the sea opposite the bay — 239×88 points, cell size 0.15 min, or 275 m. The fourth grid covered the water area of the Gelendzhik Bay. When constructing the grid, the projected port facilities were taken into account. The number of grid nodes is 238×168 , the cell size is about 27.5 m. The bathymetry for the computational grids was interpolated to the nodes from the GEBCO topographic publicly available data on a 30-second grid, as well as for the coastal zone from Kerch to the eastern border of Turkey from the digitized graphic sea maps C-Map v93.2. For the coastal part of the Gelendzhik port, depths from construction drawings, measured with an echo sounder, were used [15].

To model hydrodynamic and lithodynamic processes, two computational grids were constructed. One for the bathymetry of Gelendzhik Bay in the today's conditions, the other — taking into account the design facilities of the port and dredging zones.

The grid size in the first case is 47625 nodes, 94414 elements, in the second — 54383 nodes, 107532 elements. The linear size of the grid cells varies from 100 m in the east of the bay to 5 m in the port area (Fig. 2).

Taking into account the assumption that main seabed reshaping is usually caused by strong storms, the 5 strongest storms were selected from the period under consideration, for which currents, suspended sediments concentrations and the final picture of bed level changing were then calculated.

The table shows the simulated storms. The average duration of the storms was 8 days, and the total duration of the simulation period was 41 days.

Based on field data of seabed soils in the Gelendzhik Bay, the sediments were considered as non-cohesive sediments (sand) with the following characteristics: density — 2650 kg/m^3 ; particle size distribution — $D_{50} = 0.1 \text{ mm}$, $D_{90} = 0.3 \text{ mm}$. The soil porosity was taken equal to 0.33.

To calculate sediment transport in conditions of waves and currents action, the Van Rijn model was used. In this model, direction of sediment transport coincides with flow direction.

Table

Duration and characteristics of simulated storms

№	Dates of storm	Duration of storm, days	Significant wave height at entrance to the bay, m
1	03.12.1989–09.12.1989	6	5.80
2	16.01.1993–27.01.1993	11	5.51
3	25.12.2001–31.12.2001	6	5.44
4	30.01.2003–06.02.2003	7	5.85
5	05.11.2007–16.11.2007	11	6.18

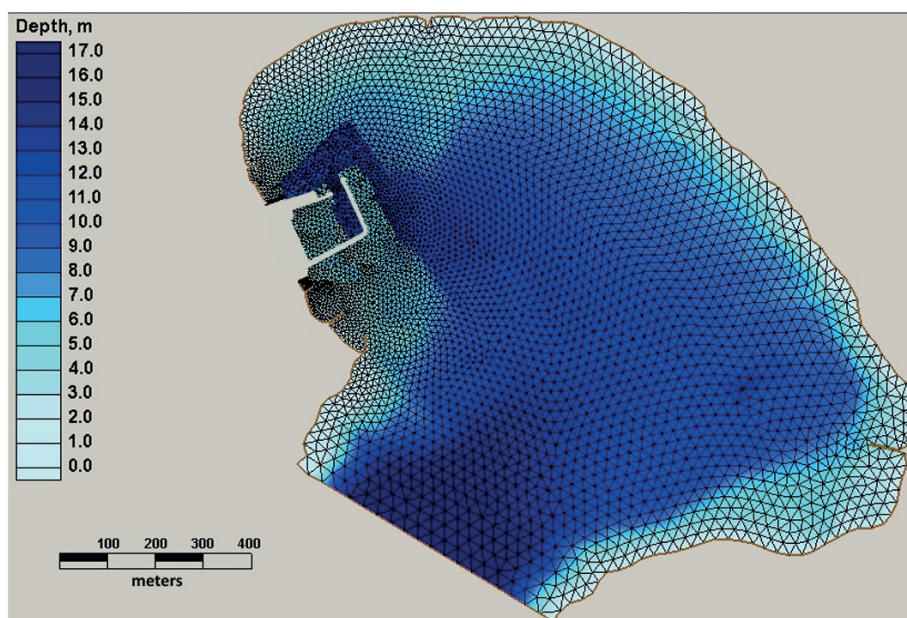


Fig. 2. Unstructured grid of SWAN and COASTOX models

3. Results and Discussion

For the selected extreme storms, with a wind force more than 10 m/s, the prevailing directions were the directions of approaching waves in the segment from south to west. The strongest winds were observed for the west and southwest directions. Wind speed from southwest reached values of 20–24 m/s. The distribution of currents in the Gelendjik Bay and in the area of the designed port during the extreme storm from 05.11.2007 to 16.11.2007 is shown in Fig. 3, 4 separates for today's conditions and after construction of port facilities.

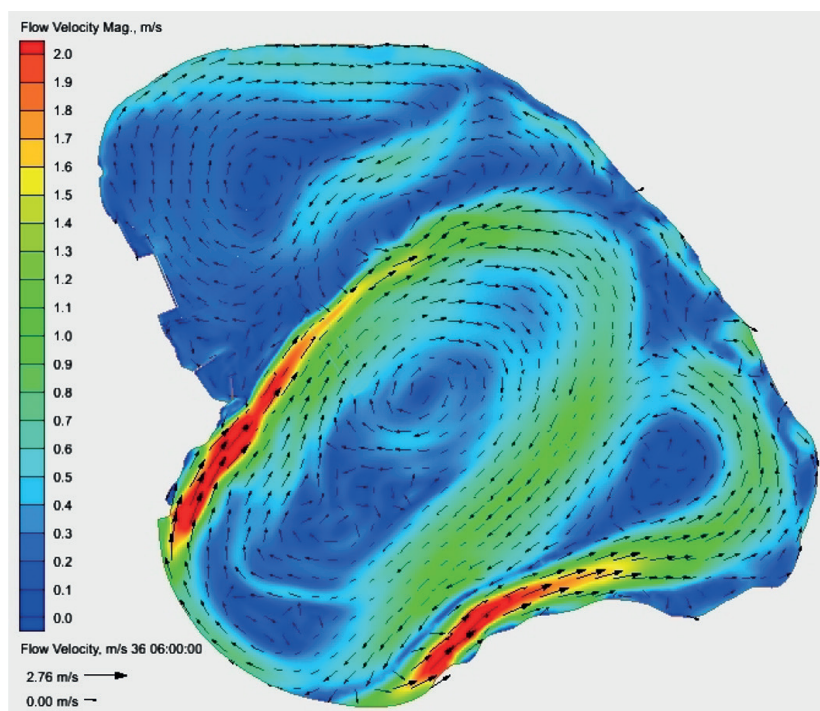


Fig. 3. Currents in the Gelendjik Bay in today's conditions

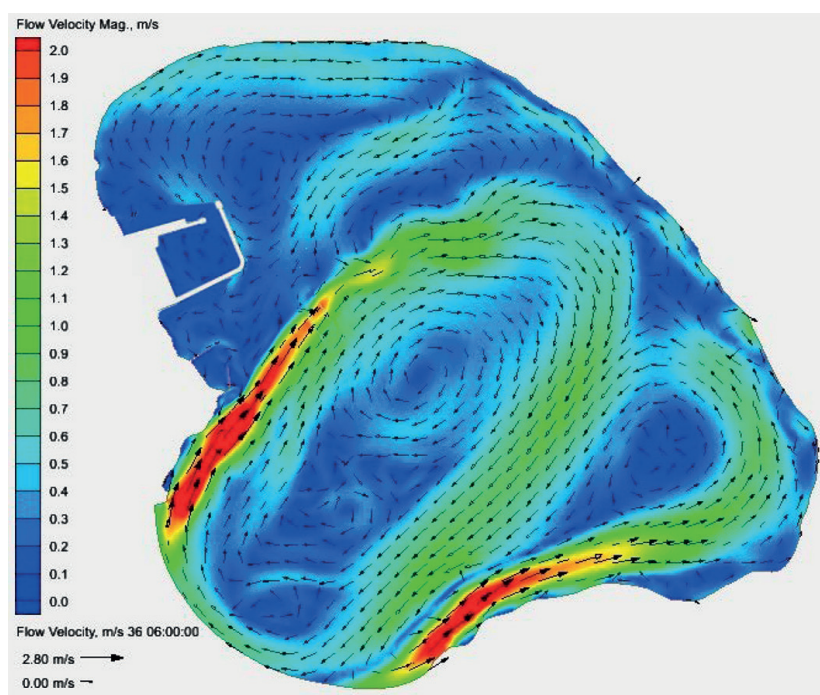


Fig. 4. Currents in the Gelendjik Bay after construction of port facilities

The construction of the Gelendjik port has practically no effect on the distribution of currents in the southeastern part of the Gelendjik Bay.

The currents in the central part of the bay are influenced by the port facilities. However, the general distribution of the currents after construction does not change. The main change is due to the fact that currents coming from the Cape Tonkyy becomes more unstable after the port construction and may deviate somewhat more to the west or east than before construction.

In addition, the distribution of currents in the northwestern part of the bay changes the most after the construction of the port. First, the form of vortices changes significantly. Their number may also change. There are also no strong alongshore currents, north of the existing pier, they are blocked by the port.

The final bed level change in the Gelendjik Bay and in the port area is shown in Fig. 5, 6.

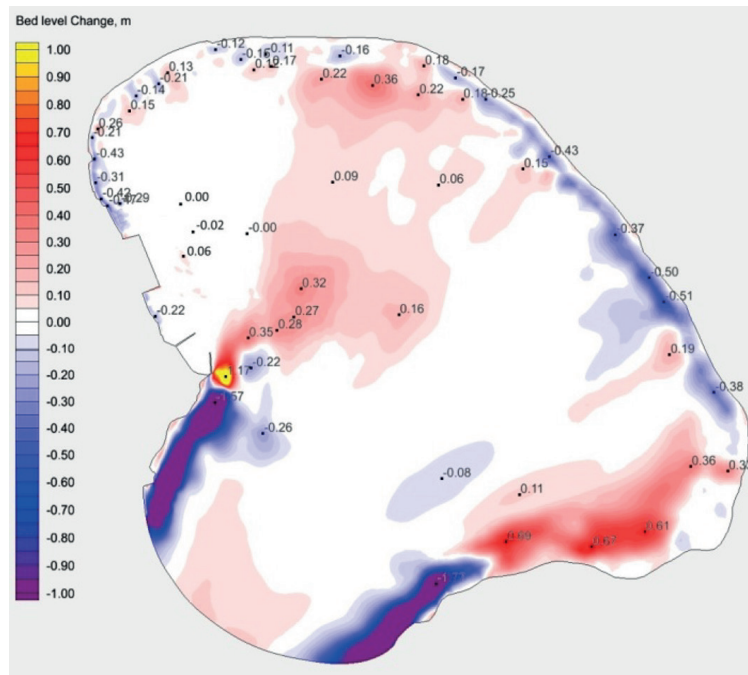


Fig. 5. Final bed level change in the Gelendjik Bay after the set of five extreme storms in today's conditions

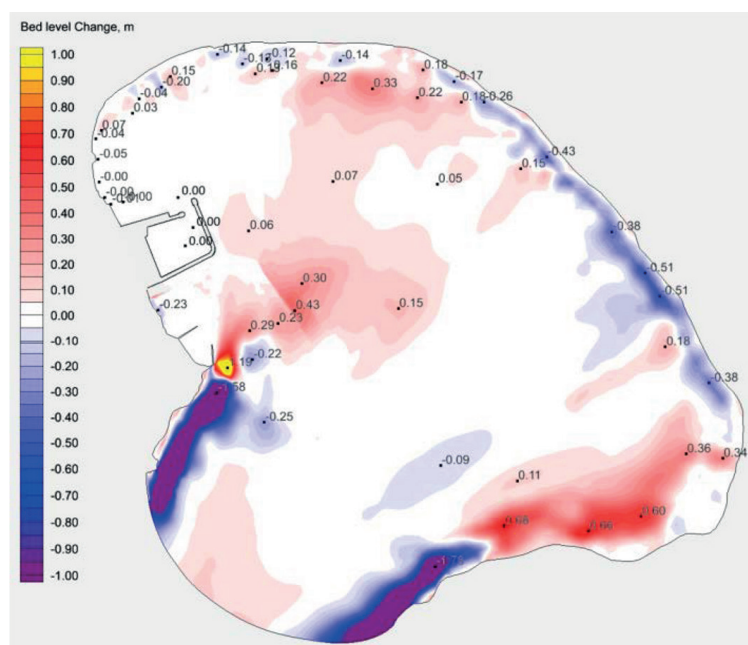


Fig. 6. Final bed level change in the Gelendjik Bay after the set of five extreme storms after construction of port facilities

Based on the analysis results of erosion/accumulation in today's conditions, it can be concluded, that the areas of the strongest bed level changes in the Gelendjik Bay are associated with the most intense currents. Thus, the largest erosion in the bay is observed in areas of strong currents near the capes that limit the entrance to the bay. The value of the maximum erosion is observed near the capes and is about 1.8 m. The eroded material is carried away by currents from the capes and is settled where the currents slow down.

In the eastern part of the bay, sediment accumulation zones of about 0.7 m in size are formed. Accumulation zones of lower values is formed in the western part of the bay, along the current course from the cape to the north, the value of accumulation thickness layer is about 0.3 m.

Significant bed level change is also observed along the coastline in the northeastern and central parts of the bay. In the northeastern part, the values of erosion are about 0.4–0.5 m. In the central part — about 0.15–0.4 m. There is also an accumulation zone of about 0.2–0.3 m in front of the erosion zone in the central part.

In the port facilities area, bed level changes are insignificant. At a distance of about 100 m southeast of the southern breakwater, there is a small accumulation zone with layer thickness of about 0.1 m.

4. Conclusions

The construction of the port in the Gelendjik Bay has no significant effect on the distribution of erosion/accumulation zones in the bay in its eastern and northern parts and along the coast in the northeast. The construction of the port caused the disappearance of the erosion zone along the coastline to the north of the constructed berth, which is due to the blocking of the currents observed here.

For the technical water areas of the port, the following can be concluded. The areas of the Gelendjik Bay, which belong to the technical water areas of the designed port, are not subject to significant sediment accumulation or erosion. Also, the dredging area to the north-east of the port generally does not tend to accumulation. In the protected port water area, the processes of bed level changing do not take place.

Acknowledgements

The author is grateful to Professor E.N. Pelinovsky for consultations during the preparation of this paper.

Funding

This study was initiated particularly in the framework of the grant of the President of the Russian Federation (MK -3792.2021.4).

References

1. Shevchenko G.V., Gorbunov A.O., Korolev P. Yu. Hydrodynamic and geomorphological conditions in the construction area of the "Port "VERA" (Ussuri Gulf). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017, 10, 2, 49–62 (in Russian).
2. Ryabchenko V.A., Leontyev I.O., Ryabchuk D.V., Sergeev A. Yu., Dvornikov A. Yu., Martyanov S.D., Zhamoida V.A. Mitigation measures of coastal erosion on the Kotlin Island's shores in the Gulf of Finland, the Baltic Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 2, 36–50. doi: 10.7868/S207366731802003X
3. Holthuijsen L. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge, Cambridge University Press, 2007, 236 p. doi:10.1017/CBO9780511618536
4. SWAN team. Swan cycle III version 41.10AB. Scientific and Technical documentation. *Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences*, 2017.
5. Tolman User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB. *Technical Note 276*, 2009, 194 p.
6. Kantarzhi I. et al. Modeling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas of the Black Sea by the chain of the proprietary and open source model. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 16, 2014.
7. Zheleznyak M. et al. Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*. 2016, 51, 129–131. doi:10.1051/radiopro/2016048
8. Anshakov A.S., Kantarzhi I.G. Verification of the numerical hydrodynamic model of the Kola Bay. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2021, 16(4), 473–485 (in Russian). doi:10.22227/1997–0935.2021.4.473–485
9. Kantardgi I.G., Zheleznyak M.I., Anshakov A.S. Numerical modeling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas. *Magazine of Civil Engineering*. 2019, 87(3), 80–92. doi:10.18720/MCE.87.7
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996, 77(3), 437–471. doi:10.1175/1520–0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2
11. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010, 91(8), 1015–1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.1

12. Saha S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*. 2014, 27, 2185–2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1
13. Van Rijn L.C. Sediment transport: Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984, 110(10), 1431–1456. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:10(1431)
14. Van Rijn L.C. Sediment transport: Part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984, 110(11), 1613–1641. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:11(1613)
15. Van Rijn L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007, 133(6), 649–667. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:6(668)
16. Camenen B., Larson M. A general formula for non-cohesive bed-load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005, 63, 249–260. doi:10.1016/j.ecss.2004.10.019
17. Kantarzi I., Anshakov A. The influence of the arrangement of protective structures on the wave regime of the port. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2018, 9, 30–37 (in Russian).

Литература

1. Шевченко Г.В., Горбунов А.О., Королев П.Ю. Гидродинамические и геоморфологические условия в районе строительства «Порта «Вера» (Уссурийский залив) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 49–62.
2. Рябенко В.А., Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Дворников А.Ю., Мартыанов С.Д., Жамойда В.А. Меры по смягчению последствий береговой эрозии на побережье острова Котлин в Финском заливе, Балтийское море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 2. С. 36–50. doi: 10.7868/S207366731802003X
3. Holthuijsen L. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 236 p. doi:10.1017/CBO9780511618536
4. SWAN team. Swan cycle III version 41.10AB. Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2017.
5. Tolman User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB. Technical Note 276. 2009, 194 p.
6. Kantarzi I. et al. Modeling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas of the Black Sea by the chain of the proprietary and open source models // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2014. Vol. 16.
7. Zheleznyak M. et al. Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers // Radioprotection. 2016. Vol. 51. P. 129–131. doi:10.1051/radiopro/2016048
8. Анишаков А.С., Кантаржи И.Г. Верификация численной гидродинамической модели Кольского залива // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, Вып. 4. С. 473–485. doi:10.22227/1997-0935.2021.4.473-485
9. Кантаржи И.Г., Железняк М.И., Анишаков А.С. Численное моделирование нелинейных гидродинамических процессов береговой зоны // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 3(87). С. 80–92. doi:10.18720/MCE.87.7
10. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR40-year reanalysis project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77(3). P. 437–471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2
11. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91(8). P. 1015–1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.1
12. Saha S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // Journal of Climate. 2014. Vol. 27. P. 2185–2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1
13. Van Rijn L.C. Sediment transport: Part I: Bed load transport // Journal of Hydraulic Engineering. 1984. Vol. 110(10). P. 1431–1456. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:10(1431)
14. Van Rijn L.C. Sediment transport: Part II: Suspended load transport // Journal of Hydraulic Engineering. 1984. Vol. 110(11). P. 1613–1641. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:11(1613)
15. Van Rijn L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007. Vol. 133(6), P. 649–667. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:6(668)
16. Camenen B., Larson M. A general formula for non-cohesive bed-load sediment transport // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005. Vol. 63. P. 249–260. doi:10.1016/j.ecss.2004.10.019
17. Кантаржи И.Г., Анишаков А.С. Влияние компоновки оградительных сооружений на волновой режим акватории порта // Гидротехническое строительство. 2018. № 9. С. 30–37.

About the Author

Alexandr S. Anshakov, ORCID: 0000-0002-0437-3109, e-mail: anshakov.aleks.xx@yandex.ru

УДК 502.2, 504, 627.8, 535.52

© А. А. Родионов^{1,2}, В. А. Румянцев², М. П. Фёдоров³, А. Т. Зиновьев⁴, В. А. Кривошей⁵, О. Е. Медведева⁶,
Ю. И. Троицкая^{1,7}, С. П. Дёмин¹, Т. И. Малова^{1*}, А. Н. Чусов³, О. Д. Шишкина^{1,7}, А. В. Моисеев⁸,
С. Б. Каменский⁹, И. М. Краев^{1,7}, К. В. Марусин⁴, 2022

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

²Санкт-Петербургский научный центр РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 5

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

⁴Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук,
656038, Россия, Барнаул, ул. Молодежная, 1

⁵Национальный центр водных проблем, 101000, Россия, Москва, ул. Мясницкая, 26, а/я 520

⁶Центральный экономико-математический институт РАН, 117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47

⁷Институт прикладной физики РАН, 603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁸Нижегородский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии», 603116, Россия, Нижний Новгород, Московское шоссе, 31

⁹Министерство экологии и природных ресурсов Нижегородской области,
603082, Нижний Новгород, Кремль, корп. 14

*malova.ti@yandex.ru

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СУДОХОДСТВА НА ЛИМИТИРОВАННОМ УЧАСТКЕ РЕКИ ВОЛГИ ОТ ГОРОДЕЦКОГО ГИДРОУЗЛА ДО НИЖНЕГО НОВГОРОДА, В ТОМ ЧИСЛЕ С УЧЕТОМ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКУЮ И ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ СИТУАЦИЮ В РЕГИОНЕ

Статья поступила в редакцию 27.03.2022, после доработки 28.11.2022, принята в печать 30.11.2022.

Аннотация

Предлагается вариант выбора оптимального решения масштабной научно-технической и эколого-экономической проблемы Европейской части РФ на основе комплексного использования результатов численного моделирования гидродинамических процессов, экспертных экологических оценок и рейтингового экономического сравнения.

Объектом научного исследования является участок реки Волги от Городецкого гидроузла до г. Нижнего Новгорода (от 852,5 до 899 км по судовому ходу). Цель работы — подготовка предложений по выбору варианта улучшения условий судоходства на рассматриваемом участке реки Волги в нижнем бьефе Городецких шлюзов при различных режимах стока через Городецкий гидроузел с учетом установленных законодательством приоритетов охраны окружающей среды, охраны водных объектов и использования водных ресурсов. В результате работы предложен вариант проекта, предполагаемого к реализации на территории Нижегородской области для рационального решения проблем судоходства на реке Волге, с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе, зоны затопления и подтопления. Проект включает строительство в районе Городецких шлюзов № 15–16 третьего параллельного шлюза и создание судоходной прорези с гарантированной глубиной фарватера 4,0 м.

Ключевые слова: внутренние водные пути, путевые работы, судовой ход, габариты судового хода, проектный уровень воды, гидротехническое сооружение, гидрологический режим, русловой процесс, регулирование стока, инженерные изыскания, трафик грузо- и пассажирских перевозок, река Волга, Горьковское и Чебоксарское водохранилища

Ссылка для цитирования: Родионов А.А., Румянцев В.А., Фёдоров М.П., Зиновьев А.Т., Кривошей В.А., Медведева О.Е., Троицкая Ю.И., Дёмин С.П., Малова Т.И., Чусов А.Н., Шишкина О.Д., Моисеев А.В., Каменский С.Б., Краев И.М., Марусин К.В. Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 4. С. 109–131. doi:10.48612/fpg/abfh-m2n7-9mn6

For citation: Rodionov A.A., Rumyantsev V.A., Fyodorov M.P., Zinoviev A.T., Krivoshei V.A., Medvedeva O. Ye., Troitskaya Yu.I., Dyomin S.P., Malova T.I., Chusov A.N., Shishkina O.D., Moiseev A.V., Kamenskiy S.B., Krayev I.M., Marusin K.V. Solution Options for Problems of Navigation on a Limited Section of the Volga River from Gorodetsky Hydroelectric Complex to Nizhny Novgorod, Including Taking Into Account the Assessment of the Impact on the Sanitary-Epidemiological and Environmental Situation in the Region. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 109–131. doi:10.48612/fpg/abfh-m2n7-9mn6

© A. A. Rodionov^{1,2}, V. A. Rumyantsev², M. P. Fyodorov³, A. T. Zinoviev⁴, V. A. Krivoshei⁵, O. Ye. Medvedeva⁶,
Yu. I. Troitskaya^{1,7}, S. P. Dyomin¹, T. I. Malova^{1*}, A. N. Chusov³, O. D. Shishkina^{1,7}, A. V. Moiseev⁸, S. B. Kamenskiy⁹,
I. M. Krayev^{1,7}, K. V. Marusin⁴, 2022

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

²St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Universitetskaya Nab., St. Petersburg, 199034, Russia

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russia

⁴Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Molodezhnaya, Barnaul, 656038, Russia

⁵National Center of Water Problems, Moscow, 26 Myasnitskaya, PO box 520, Moscow, 101000, Russia

⁶Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, 47 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117418, Russia

⁷Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, 46 Ul'anova str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

⁸Nizhny Novgorod Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 31 Moskovskoe shosse, Nizhny Novgorod, 603116, Russia

⁹Ministry of Ecology and Natural Resources of the Nizhny Novgorod Region, 14 Kremlin, Nizhny Novgorod, 603082, Russia
*malova.ti@yandex.ru

SOLUTION OPTIONS FOR PROBLEMS OF NAVIGATION ON A LIMITED SECTION OF THE VOLGA RIVER FROM GORODETSKY HYDROELECTRIC COMPLEX TO NIZHNY NOVGOROD, INCLUDING TAKING INTO ACCOUNT THE ASSESSMENT OF THE IMPACT ON THE SANITARY-EPIDEMIOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL SITUATION IN THE REGION

Received 27.03.2022, Revised 28.11.2022, Accepted 30.11.2022

Abstract

The paper proposes a variant of choosing the optimal solution to the large-scale scientific, technical and ecological-economic problem of the European part of the Russian Federation based on the integrated use of results of numerical modeling of hydrodynamic processes, expert environmental assessments and rating economic comparison.

The object of scientific research is the section of the Volga River from the Gorodetsky hydroelectric complex to Nizhny Novgorod (from 852.5 to 899 km along the ship's course). The purpose of the work is to prepare proposals for the choice of an option for improving navigation conditions on the Volga River section under consideration in the lower reaches of the Gorodetsky locks under various flow regimes through the Gorodetsky hydroelectric complex, taking into account the priorities of environmental protection, protection of water bodies and use of water resources established by legislation. As a result of the work, a variant of the project proposed for implementation on the territory of the Nizhny Novgorod region for the rational solution of navigation problems on the Volga River, taking into account the assessment of the impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region, flooding and flooding zones. The project includes the construction of a third parallel lock in the area of Gorodetsky locks No. 15–16 and the creation of a navigable slot with a guaranteed fairway depth of 4.0 m.

Keywords: inland waterways, track works, ship's course, dimensions of the ship's course, design water level, hydraulic structure, hydrological regime, riverbed process, flow regulation, engineering surveys, cargo and passenger traffic, the Volga River, the Gorky and Cheboksary Reservoirs

1. Введение

Функционирование единой глубоководной системы Европейской части России неразрывно связано с каскадом Волжско-Камских водохранилищ, завершающим и связующим звеном которого стал последний из введенных в эксплуатацию Чебоксарский гидроузел. В связи с объективными экономическими и социально-экологическими проблемами, Чебоксарское водохранилище не было наполнено до отметки нормального подпорного уровня (НПУ) 68,0 м в Балтийской системе высот (БС) и с 1982 г. эксплуатируется в непроектном режиме, что в сочетании с рядом других факторов привело к формированию в нижнем бьефе расположенного выше по каскаду Городецкого гидроузла проблемного для судоходства участка. Отсутствие гарантированного габарита судового хода на центральном участке единой глубоководной системы снижает экономическую эффективность водного транспорта и оказывает негативное влияние на обороноспособность Европейской части РФ, поэтому начиная с 1995 г. предлагались различные варианты решения данной проблемы [1].

В 2020 г. ведущие профильные институты Российской академии наук объединились для решения острой и актуальной проблемы, заключающейся в выборе варианта проекта, предполагаемого к реализа-

ции на территории Нижегородской области, с целью решения вопросов судоходства на реке Волге. Речь шла об участке между Нижним Новгородом и Городцом — единственном участке в среднем течении реки, оставшемся не зарегулированным, самом «узком месте» и для транспортников, и для экологов (рис. 1). Эта работа была выполнена в рамках НИР по техническому заданию, согласованному Министерством экологии и природных ресурсов Нижегородской области.

На нижних порогах нижней ступени Городецких шлюзов и на участке водного пути по р. Волге от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода гарантированные глубины для судоходства, необходимые для прохождения судов, поддерживаются не постоянно, а в течение нескольких часов в сутки в зависимости от пусков воды через Городецкий гидроузел, что создает трудности при проводке крупнотоннажных судов. Эта проблема имеет комплексный характер — здесь сплелись практические и социально-экологические интересы всех водопользователей и жителей практически большинства населенных пунктов, расположенных в прибрежной полосе водотока.

Рассматриваемый в настоящей статье проточный участок Волги с прилегающей поймой и соответствующие экосистемы находятся под угрозой уничтожения [2–4]. В то же время территория Нижегородского Приволжья, прилегающая к проточному участку Волги и частично озерной части Чебоксарского водохранилища, богата объектами природного и историко-культурного наследия, а сам проточный участок Волги является важнейшей и ключевой частью природно-исторического комплекса Нижегородского Приволжья [5].

Основными водными объектами, формирующими проблемы и узлы противоречий на данном участке реки Волга, являются:

- Горьковское водохранилище, производящее регулярные пуски воды на нижерасположенный участок нижнего бьефа;
- участок руслового стока Волги, заключенный между плотиной водохранилища и устьем Оки в Нижнем Новгороде;
- находящееся ниже по течению Чебоксарское водохранилище, при этом подпор воды Волги от плотины Чебоксарского гидроузла не доходит до плотины Нижегородской ГЭС.

Пуск в эксплуатацию Чебоксарского гидроузла при пониженном напоре (61,0 м БС) был осуществлен в конце декабря 1980 г. в соответствии с распоряжением Совета Министров СССР от 06.01.1978 № 28-р [6]. В целях обеспечения навигации в 1981 г. НПУ наполнения Чебоксарского водохранилища был увеличен до 63,0 м БС и с тех пор не менялся в соответствии с Решениями правительственных органов [7–9, 11, 12], хотя попытки поднятия уровня предпринимались [9, 10].

Отказ от дальнейшего повышения уровня Чебоксарского водохранилища, безусловно, был разумным государственным решением, предотвратившим затопление и подтопление огромной территории и снявшим



Рис. 1. Схема р. Волги от Рыбинского до Куйбышевского водохранилища. Цифрами обозначены нормальные подпорные уровни в метрах Балтийской системы

Fig. 1. Scheme of the Volga River from Rybinsk to Kuibyshev Reservoir. The numbers indicate normal retaining levels in the Baltic System meters

угрозы экосистеме Волги, экономике и населению региона [13]. Однако возникла необходимость рассмотрения иных вариантов улучшения условий для судоходства на речном участке Чебоксарского водохранилища от Городца до Нижнего Новгорода, где глубина 4 м в настоящее время обеспечивается только при расходе попуска воды через плотину Городецкого гидроузла свыше 1400 м³/с.

Данные вопросы урегулированы «Основными правилами использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ на р. Волге», утвержденными Министерством мелиорации и водного хозяйства РСФСР 11 ноября 1983 г., действующими до настоящего времени [14], а также ежегодно издаваемыми распоряжениями Федерального агентства морского и речного транспорта [15–17].

В соответствии с поручением Президента РФ от 25.03.2020 г. № Пр-573 необходимо было подготовить согласованные предложения по решению проблем судоходства на р. Волге с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе. В апреле 2020 г. Губернатором Нижегородской области Г.С. Никитиным в адрес Заместителя Председателя Правительства РФ М.Ш. Хуснулина было направлено письмо с предложением заменить реализацию проекта строительства Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГу) иным мероприятием по обеспечению судоходных условий, не наносящим вред населению и окружающей среде [18, 19]. Эти предложения были сформулированы по результатам научно-исследовательской работы, выполненной в конце 2019 г. ведущим в России институтом в сфере гидротехники — ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева (г. Санкт-Петербург) [20–24] и большого числа обсуждений в самых разных форматах под руководством Российской академии наук и Главгосэкспертизы России [25–28].

Решениями совещаний в Минстрое России от 14 апреля и от 26 июня 2020 г. Российской академии наук совместно с Росморречфлотом и Правительством Нижегородской области предложено во исполнение поручения Президента РФ от 25.03.2020 г. № Пр-573 осуществить моделирование и соответствующую проработку сценариев решения проблемы судоходства.

Правительством Нижегородской области в конце 2020 г. было инициировано выполнение НИР «Систематизация и анализ информации для выбора варианта проекта, предполагаемого к реализации на территории Нижегородской области, с целью решения проблем судоходства на реке Волге, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе, зоны затопления и подтопления» [29] в рамках договора с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Санкт-Петербургским филиалом), с привлечением соисполнителей, по заказу АНО «Проектный офис Стратегии развития Нижегородской области».

Для достижения поставленной цели после выполнения необходимых предварительных работ [29], обзор которых дается в следующей части статьи, было решено выполнить экспертную оценку существовавших предложений по вариантам улучшения условий судоходства на рассматриваемом участке, включая:

- строительство ННГу в створе острова Ревякский с нормальным подпорным уровнем в верхнем бьефе на отметке 68,0 м БС в период навигации (рис. 2);
- строительство в районе Городецких шлюзов № 15–16 третьего параллельного шлюза с отметкой порога в нижнем бьефе 61,0 м БС и создание судоходной прорези с гарантированной глубиной фарватера 4,0 м (рис. 3);

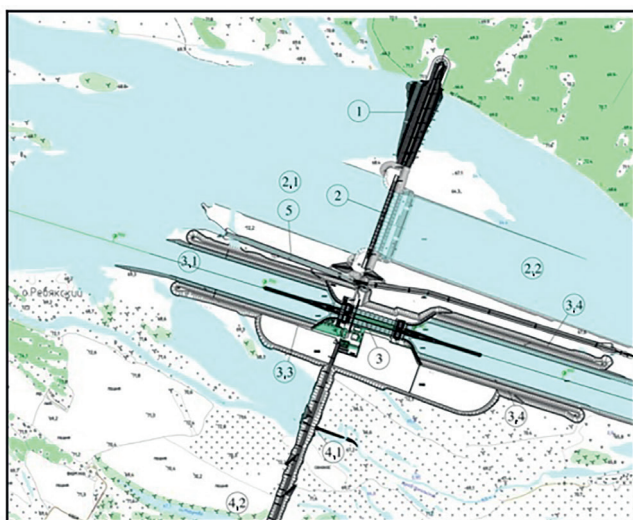


Рис. 2. Вариант строительства Нижегородского низконапорного гидроузла. Цифрами обозначены: 1 — русловая земляная плотина, 2 — водосбросная плотина, 2.1 — канал верхнего бьефа, 2.2 — канал нижнего бьефа, 3 — судоходный шлюз, 3.1 — верхний подходный канал, 3.3 — дамбы верхнего подходного канала, 3.4 — дамбы нижнего подходного канала, 4.1 — водопропускное сооружение № 1, 4.2 — водопропускное сооружение № 2, 5 — рыбопропускное сооружение

Fig. 2. A variant of the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure waterworks. The numbers indicate: 1 — channel earthen dam, 2 — spillway dam, 2.1 — upstream channel, 2.2 — downstream channel, 3 — shipping lock, 3.1 — upper approach channel, 3.3 — dams of the upper approach channel, 3.4 — dams of the lower approach channel, 4.1 — culvert No 1, 4.2 — culvert No 2, 5 — fish culvert



Рис. 3. Вариант строительства третьей нитки судоходного шлюза

Fig. 3. A variant of the construction of the third line of the shipping gateway



Рис. 4. Вариант строительства второй камеры шлюза № 15А

Fig. 4. A variant of the construction of the second chamber of the gateway № 15А

— строительство в составе Городецких шлюзов дополнительной камеры № 15А и создание судоходной прорези с гарантированной глубиной фарватера 4,0 м (рис. 4).

В работе представлены разделы, посвященные гидрологическим условиям и интенсивности грузоперевозок, анализу вариантов улучшения условий судоходства, а также сравнению этих вариантов по различным параметрам.

2. Гидрологические условия и интенсивность грузоперевозок

В настоящем разделе рассматриваются проблемы, связанные с гидрологическими условиями плавания судов на рассматриваемом участке р. Волги, и изменения в объемах грузоперевозок.

1. Решение проблемы посадки уровней воды в нижнем бьефе Городецкого гидроузла (по данным проектантов ННГУ — 2 см/год; по данным ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева в 2000-х гг. посадка уровня существенно снизилась) требовало выявления ее темпов в створах гидрологических постов «Городец», «Балахна» и «Нижний Новгород». Методом решения здесь стало построение зависимостей средних уровней воды от средних сбросных расходов, осредненных по периодам примерного постоянства сбросных расходов (рис. 5), а также множественный регрессионный анализ зависимостей отклонений среднегодовых уровней воды от сбросных расходов и года наблюдения (рис. 6).

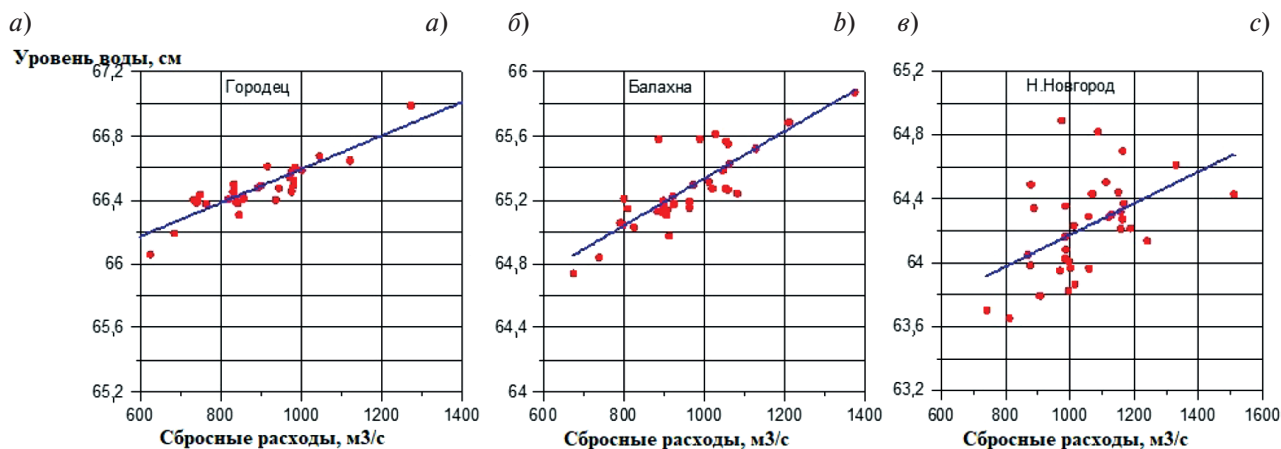


Рис. 5. Зависимости осредненных уровней воды (регрессия), полученных по оперативным данным, в створах гидрологических постов «Городец» (а), «Балахна» (б) и «Нижний Новгород» (в) от осредненных сбросных расходов Городецкого гидроузла в 2002–2020 гг. Точками обозначены экспериментальные данные

Fig. 5. The dependences of the averaged water levels (regression) obtained from operational data in the structures of the hydrological posts «Gorodets» (a), «Balakhna» (b) and «Nizhny Novgorod» (c) on the averaged discharge costs of the Gorodetsky hydroelectric power plant in 2002–2020. The dots indicate experimental data

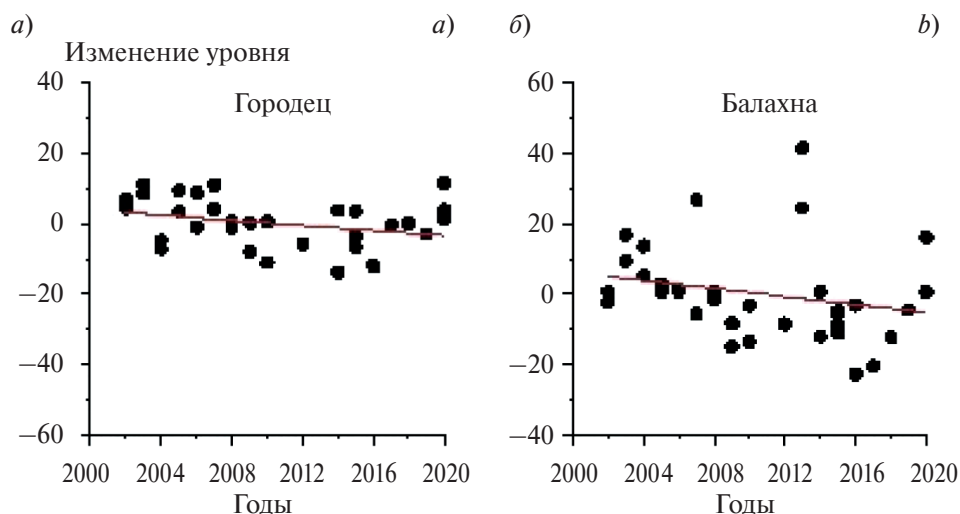


Рис. 6. Временные зависимости отклонений уровня воды (регрессия) от осредненной кривой связи уровней воды в створах «Городец» (а), «Балахна» (б) и сбросных расходов воды Городецкого гидроузла. Точками обозначены экспериментальные данные

Fig. 6. Time dependences of deviations of the water level (regression) from the averaged curve of the relationship of water levels in the structures «Gorodets» (a), «Balakhna» (b) and discharge water flows of the Gorodetsky hydroelectric power plant. The dots indicate experimental data

В результате было установлено, что в створах гидрологических постов «Городец» и «Балахна» посадка уровней воды слабая, в пределах экспериментальной погрешности — соответственно, 4 и 6 мм/год.

2. Решение проблемы изменения морфометрической характеристики русла и прилегающей поймы реки Волги требовало определения характеристики русла и оценки объема дноуглубительных работ. В этом вопросе методом решения стал анализ поперечных профилей живого сечения русла реки Волги, а также экстраполяция данных уровнемерных постов (рис. 7).

В результате было определено, что максимальные глубины (менее 4 м) наблюдаются в ряде створов на участке от нижнего бьефа НижГЭС до г. Балахна при среднесуточных сбросных расходах 800 м³/с и 1100 м³/с. Ниже г. Балахна максимальные глубины превышают 4 м. При среднем сбросном расходе 1300 м³/с максимальные глубины во всех расчетных створах превышают 3,7 м. Также было установлено

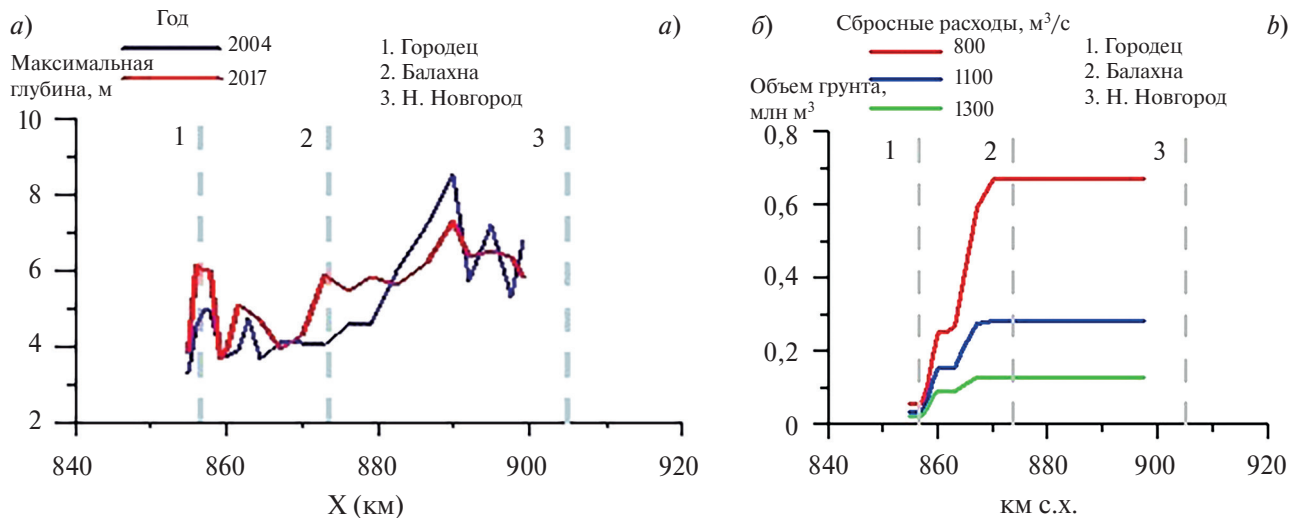


Рис. 7. Максимальные глубины реки Волги в расчетных поперечных створах от нижнего бьефа НижГЭС до Нижнего Новгорода, среднесуточный сбросной расход 1300 м³/с (а) и объем необходимой выемки грунта для создания судоходной прорези шириной 100 м между створом нижнего бьефа НижГЭС и текущим створом по судовому ходу (б)

Fig. 7. The maximum depths of the Volga River in the calculated transverse sections from the lower reaches of the NizhNES to Nizhny Novgorod, the average daily discharge flow rate of 1300 m³/s (a) and the volume of necessary excavation to create a navigable slot 100 m wide between the lower reaches of the NizhNES and the current channel along the ship's course (b)

(по предварительным расчетным данным), что для обеспечения судоходной глубины 4 м создание судоходной прорези требуется в основном на участке от нижнего бьефа НижГЭС до г. Балахна (длиной около 15 км).

3. Решение проблемы снижения высоты волны попуска при сохранении сбросных расходов Нижегородской ГЭС требовало исследования динамики морфологии дна на приплотинном участке реки Волги в зависимости от высоты волны попуска в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС. В качестве метода было использовано сравнение продольных скоростей потока, сформированных в зависимости от морфометрии исследуемого участка.

В результате была получена и верифицирована зависимость высоты волны попуска от глубины мелководной и глубоководной зон русла на приплотинном участке нижнего бьефа Нижегородской ГЭС (рис. 8). Профилирование дна на приплотинном участке русла может использоваться в качестве дополнительного способа достижения требуемого уровня воды в р. Волге для обеспечения безопасного судоходства в районе Городецкого гидроузла.

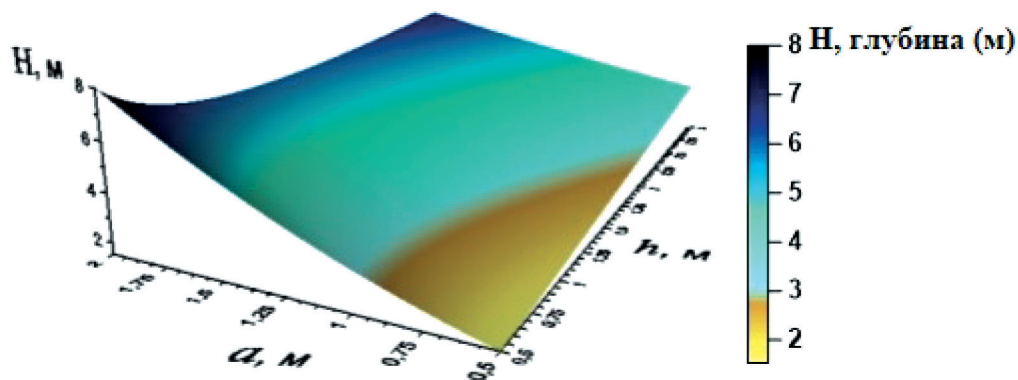


Рис. 8. Зависимость высоты волны попуска (а) от глубины мелководной (h) и глубоководной (H) зон русла на приплотинном участке нижнего бьефа Нижегородской ГЭС

Fig. 8. The dependence of the height of the release wave (a) vs. the depth of the shallow (h) and deep (H) channel zones near the dam of the Nizhny Novgorod HES from its lower reaches

4. Решение проблемы транспорта наносов требовало детального исследования и анализа данных о гранулометрическом составе и распределении донных наносов, а также расходном режиме и характеристиках взвешенных наносов. Источником данных послужили инженерно-геологические и инженерно-гидрографические изыскания, выполненные в ходе проектирования ННГУ (рис. 9).

Результатом исследования стало выделение трех зон по основным типам грунта, слагающего русло реки:

- верхняя зона — 854–857 км судового хода (с. х.) — связный грунт (глины и суглинки);
- средняя зона — 857–876,5 км с. х. — смешанный грунт (глины, суглинки, пески);
- нижняя зона — 876,5–900 км с. х. — несвязный грунт, песок средней крупности (медианный диаметр 0,3–0,5 мм); мощность слоя — значительна, в створе ННГУ — до 40 м.

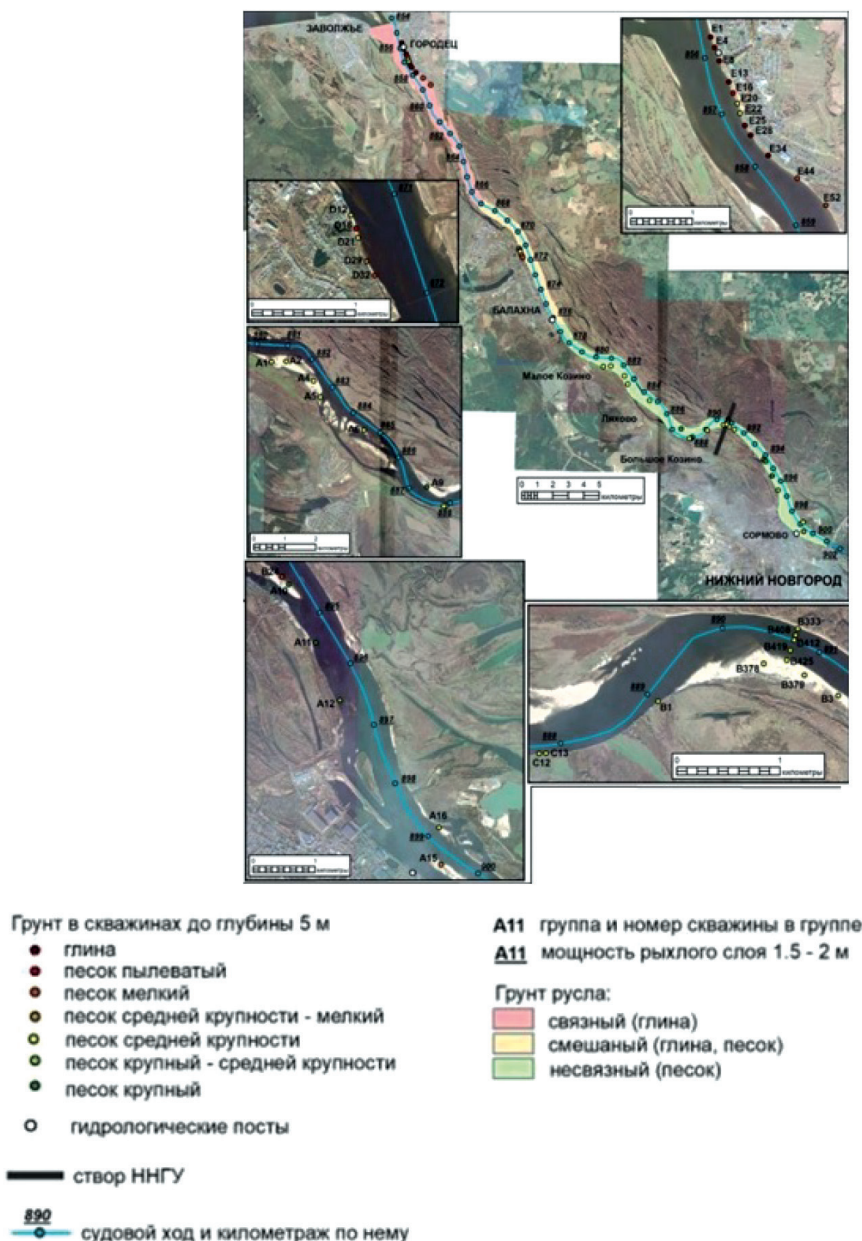


Рис. 9. Характеристика грунтов на рассматриваемом участке р. Волги, согласно инженерно-геологическим и инженерно-гидрографическим изысканиям, выполненным в ходе проектирования ННГУ

Fig. 9. Characteristics of soils on the considered section of the Volga River, according to engineering-geological and engineering-hydrographic surveys carried out during the design of the Nizhny Novgorod low-pressure waterworks

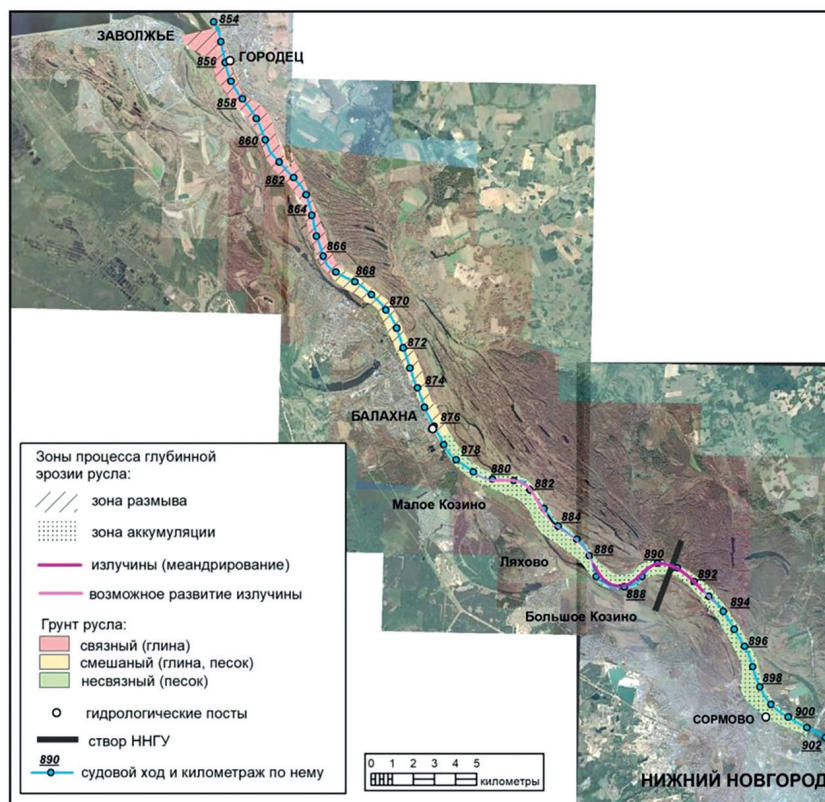


Рис. 10. Характеристика русловых процессов в нижнем бьефе Городецкого гидроузла за период его эксплуатации

Fig. 10. Characteristics of riverbed processes in the lower reaches of the Gorky hydroelectric complex during its operation

Также было показано, что транспорт наносов в современных условиях имеет место:

- в верхней зоне — в половодье,
- в средней и нижней зонах — во всем диапазоне расходов воды навигационного периода.

Для подробной характеристики грунтов в верхней зоне, и особенно в средней зоне, где присутствует рыхлая фракция, имеющихся данных пока недостаточно. Также пока не представляется возможным (ввиду отсутствия необходимых данных) достоверно оценить величину расхода наносов, как русловых, так и вне-русловых.

5. Решение проблемы временной изменчивости русла требовало анализа русловых процессов в нижнем бьефе Городецкого гидроузла за период его эксплуатации (рис. 10).

В результате было установлено следующее.

Ведущий русловой процесс — необратимые вертикальные деформации русла (глубинная эрозия или врезание русла), обусловленные перехватом потока наносов плотиной Нижегородской ГЭС.

В русле формируются две зоны: зона необратимого размыва русла и нижележащая зона аккумуляции наносов. Фронт зоны размыва в настоящее время располагается у г. Балахна (875–877 км с.х.) и медленно смещается вниз по течению.

Процесс необратимого размыва русла приводит к понижению отметок уровней воды («посадке уровней»). В ходе врезания русла на участке 854–867 км с.х. достигнут слой глинистого грунта, скорость размыва которого гораздо ниже в районе Городца, чем для рыхлых песчаных наносов ниже Балахны.

В зоне аккумуляции (начиная с отметки 878 км с.х.) постепенное накопление наносов обусловило и поддерживает процесс меандрирования русла, а именно, процесс развития двух сопряженных излучин, расположенных на отрезке 886–893 км с.х.

В настоящий момент эти излучины находятся на первой стадии своего развития, для которой характерно продольное смещение с размывом выпуклых берегов в верхних крыльях и вогнутых в нижних. При этом будут также перемещаться и перекаты, связанные с этими излучинами.

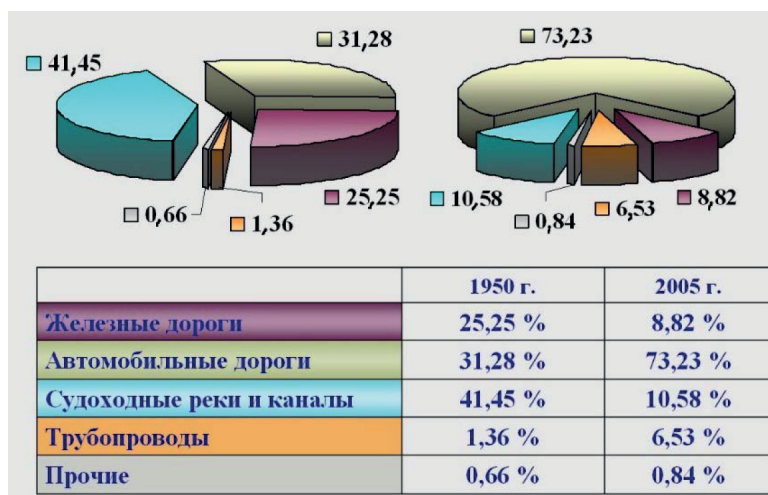


Рис. 11. Внутренние водные пути в транспортной сети России в 1950 и 2005 гг.

Fig. 11. Inland waterways in the transport network of Russia in 1950 and 2005

6. Анализ грузовых перевозок по внутренним водным путям России показал, что их объемы постоянно меняются с тенденцией к дальнейшему снижению (рис. 11). За период 2000–2019 гг. перевозка грузов сократилась с 116,8 до 108 млн. т. Доля грузов, перевезенных водным транспортом в транспортной системе России, уменьшилась до 1,28 %. Аналогичные процессы происходят на Городецком гидроузле.

3. Анализ вариантов улучшения условий судоходства

3.1. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла

Технические характеристики ННГУ (рис. 2).

Русловая земляная плотина длиной 701,6 м с отметкой гребня 80,40 м. Ширина по гребню — 12 м. В основании низового откоса плотины предусмотрен каменный банкет с отметкой гребня 68,00 м.

Водосбросная плотина — железобетонная. Представляет собой водослив с широким порогом. Плотина имеет 16 поверхностных водосбросных отверстий шириной по 20,0 м.

Общая длина рыбопропускного канала — 3075,5 м. В устье канала устроена заводь в виде двухсотметрового уширения с постепенным сужением до 6 м. Отметка уровня воды в устье принята равной 68,00 м, отметка уровня воды на выходе канала в нижнем бьефе — 64,10 м.

В состав основных гидротехнических сооружений входит двухниточный шлюз с камерами длиной 300,0 м, шириной 30,0 м и глубиной на порогах шлюза 5,0 м.

Правобережная коммуникационная дамба со служебной автодорогой по гребню и водопропускными сооружениями длиной 3887,44 м.

Основные недостатки данного варианта:

- низкая пропускная способность;
- снижение выработки электроэнергии НижГЭС;
- большие экологические риски, в том числе для водных биоресурсов и среды их обитания;
- низкие показатели социальной эффективности (затопление и подтопление береговых объектов, в том числе ИЖС);
- низкие экономические показатели (по стоимости, длительности строительства и ущербу от вывода земель из оборота).

Решение проблемы обеспечения экологических и санитарно-гигиенических условий для поддержания уровня воды в р. Волге требовало составления перечня объектов, подверженных воздействию колебаний уровней воды, перечня особо опасных объектов, попадающих в зону затоплений и подтоплений, а также оценки влияния ННГУ на объекты инфраструктуры (рис. 12). Поставленные задачи решались методами рекогносцировочных обследований территорий, камеральных исследований на моделях, анализа данных проекта и литературных источников (табл. 1) [20].

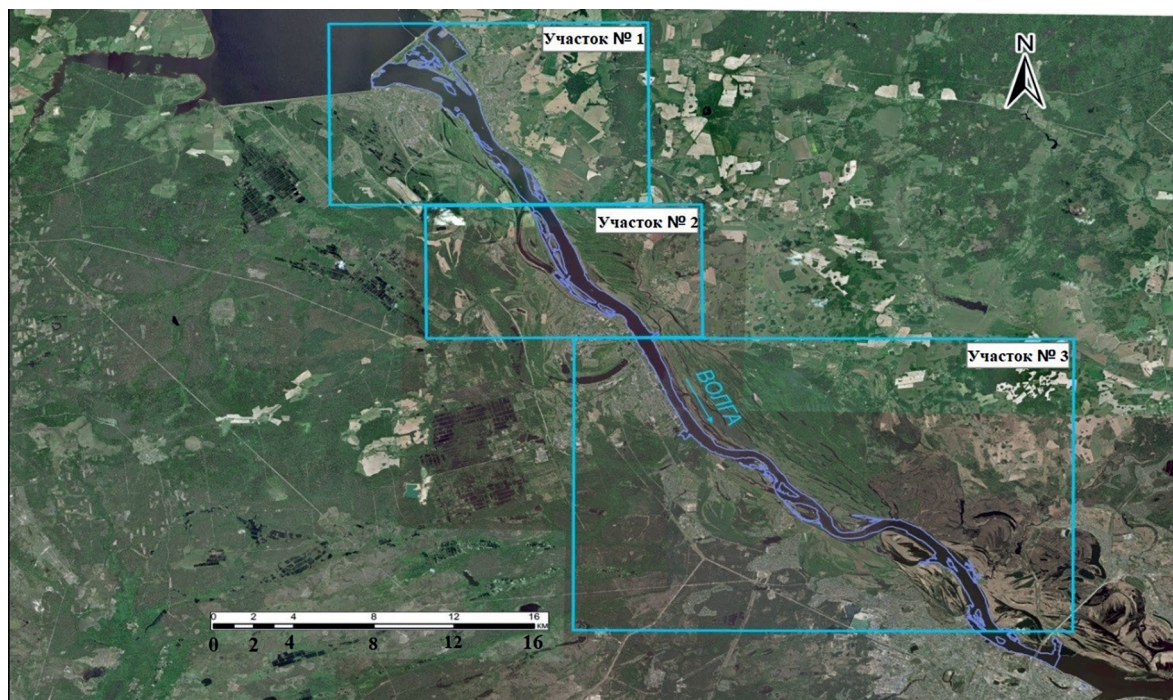


Рис. 12. Схема расположения участков вдоль русла Волги: 1 — Городецкий район, 2 — Балахнинский район, 3 — Сормовский район

Fig. 12. The layout of the sites along the Volga riverbed: 1 — Gorodetsky district, 2 — Balakhninsky district, 3 — Sormovsky district

Таблица 1

Table 1

Перечень объектов, подверженных воздействию колебаний уровней воды

A list of objects affected by fluctuations in water levels

Городецкий район
г. Заволжье, правый берег, протяженность коллекторов 16 км; г. Городец и территории прилегающих населенных пунктов. На острове Зеленом расположено значительное количество зарегистрированных участков садоводческих товариществ; - оз. Спасское, соединяющееся с Волгой протокой, много садоводств; п. Нижняя Слобода, проходит так называемый один из четырех «разрывов», а именно — сочленение оврага прилегающих пойменных территорий с русловой частью реки Волги; - близ д. Речной и д. Варварское Кумохинского сельского поселения, в 800 м от р. Узола, у д. Горбуново расположен скотомогильник сибирской язвы; - дренажный канал, через который при подъеме уровня воды до отметки 68,0 м вода из реки Волги будет поступать на пойменные территории, обуславливая затопление и подтопление территорий; - населенные пункты, расположенные по берегу р. Узола; - берегообрушения в границах населенных пунктов; - разветвленная гидравлическая система притоков реки Волги, многочисленных озер, старичных образований, проток.
Сормовский район
- Территория частного сектора располагается вдоль дороги на Балахну (трасса: Р-152: ул. КИМа, ул. Землячки, ул. Ясной, около 6 тысяч домов); - памятник природы «Копосовская Дубрава» с видами флоры, занесенными в Красную книгу; - индивидуальные источники водоснабжения (около 2 тысяч домов); - предприятие АО «Корунд» — является объектом накопленного экологического ущерба, на территории складировались кислые гудроны, гальванические отходы, бытовые и пр. опасные отходы; - места проведения ежегодного фестиваля <i>Alfa Future People</i> у Храма Михаила Архангела (пойма, заболачивание, откачка).

Окончание табл. 1

Fin table 1

Балахнинский район
• г. Балахна, центральные улицы г. Балахны, территории города на западе и юге; • грунтовые воды города; • 4 кладбища, в районе расположения которых уровень грунтовых вод выше нормативной отметки; • пригороды г. Балахны занимают частные дома и садоводческие товарищества, имеющие водопроницаемые выгребы и помойники; • промплощадки предприятий, коллекторы, очистные сооружения, места складирования отходов; • берег в границах Балахнинского района сложен легкоразмываемыми грунтами; • муниципальное образование «рабочий посёлок Большое Козино» • частные водозаборы; • на территории 56 квартала Большекозинского лесничества, на расстоянии около 20 км от г. Дзержинска и в 13 км от г. Балахны расположены хранилища (копаны) кислых гудронов — 6,25 га (10 карт (копаней), 170 тыс. м³ отходов); • Тепловский водозабор, обеспечивающий питьевым водоснабжением г. Дзержинск; • на расстоянии 20 км от города Дзержинска, в 13 км от г. Балахны располагаются сооружения карт для размещения промышленных отходов (бывшего ПО «Корунд») — 18,2 га; • в районе р. п. Малое Козино расположено подсобное хозяйство Балахнинской птицефабрики, закрытое после вспышки туберкулеза среди крупного рогатого скота, на территории которого производилось складирование навоза больных туберкулезом животных; • рабочий посёлок Лукино, берегообрушение реки Волги и подтопление, эрозия берега, кладбище и многое другое.

В результате установлено следующее.

В зону подтопления и затопления попадают: 10 населенных пунктов (около 100 тыс. жителей), 2 тыс. дачных участков, 37 объектов археологического и культурного наследия, более 50 тыс. га земельных угодий, 2 скотомогильника.

Будет наблюдаться сокращение рыбопродуктивности на площади 935 га в течение 100 лет.

Очевидна необходимость строительства берегоукрепительных сооружений в городах Городце, Заволжье, Балахнинском и Сормовском районах.

Будет наблюдаться ухудшение качества технической и питьевой воды, а также ухудшение санитарной и маляриогенной обстановки.

3.2. Строительство рядом с Городецкими шлюзами № 15–16 третьего параллельного шлюза (3-я нитка)

Технические характеристики рассматриваемого варианта (рис. 3; рис. 13 [24]).

Состав основных гидротехнических сооружений: верхняя и нижняя головы шлюза; камера шлюза; подходные каналы; причальные и направляющие сооружения в верхнем и нижнем подходных каналах.

Расчетные наивысшие судоходные уровни воды в бьефах шлюза установлены по максимальному расходу воды при расчетной вероятности превышения для сверхмагистральных водных путей в 1 % с учетом повышения уровней воды вследствие ветрового нагона, образования заторов и зажоров, явлений неустойчивого движения.

Глубина на порогах шлюза, отсчитываемая от наинизших судоходных уровней воды в бьефах, определила проектные отметки сооружения: порог верхней головы — 71,50 м БС; порог нижней головы и дно камеры — 61,00 м БС. Конструкция третьей нитки шлюза была принята аналогичной конструкции шлюзов № 15 и 16.

Основные недостатки рассматриваемого варианта:

— необходимость создания судоходной прорези в нижнем бьефе гидроузла (в силу необходимости создания и поддержания эксплуатационных условий);

— отсутствие проектной документации (на которую требуется дополнительное время) на момент выполнения НИР.

Решение проблемы влияния судоходной прорези на русловые процессы предполагало оценку варианта обеспечения судоходства с судоходной прорезью в аспекте русловых процессов, протекающих на участке реки Волги от Городецкого гидроузла до г. Нижний Новгород (рис. 14 [22]).

В результате получены следующие выводы.

Разработка прорези усилит процесс глубинной эрозии русла в зоне размыва, даже там, где он сейчас практически не проявляется (в районе Городца), что приведет к дальнейшей посадке уровней.

Помещенный в русловые отвалы разрыхленный грунт будет являться дополнительным источником русловых наносов для питания потока, особенно в период половодья.

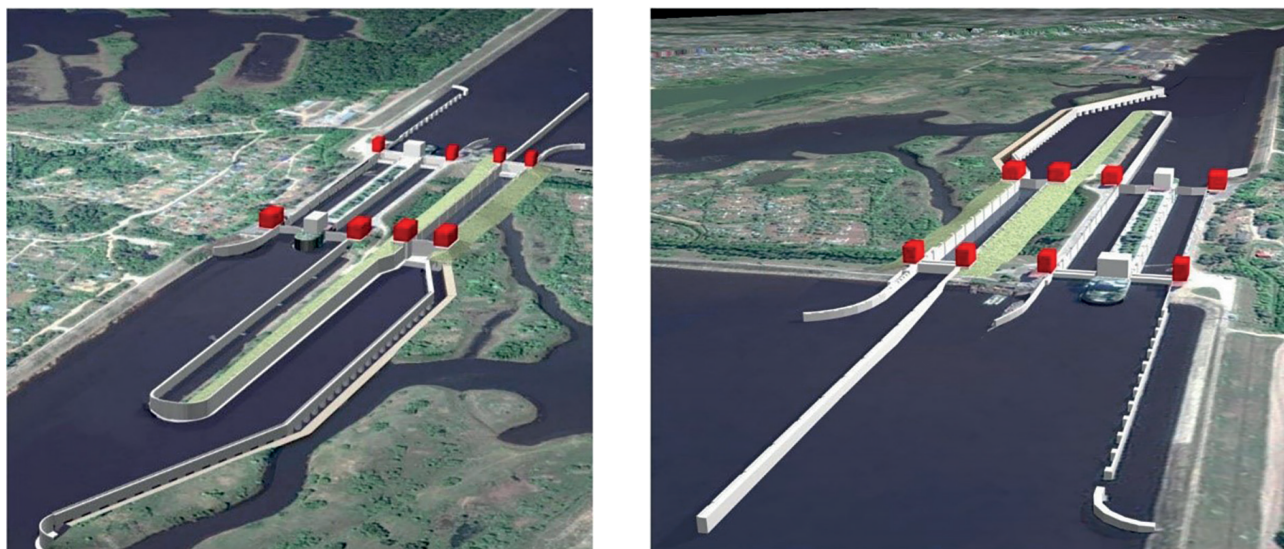


Рис. 13. Общий вид третьей нитки Городецких шлюзов [24]

Fig. 13. General view of the third line of Gorodetsky locks [24]



Рис. 14. Варианты прокладки судоходной прорези при различных навигационных попусках Городецкого гидроузла. Черная кривая — рельеф дна [22]

Fig. 14. Options for laying a navigable slot under the various navigation releases of the Gorodetsky hydroelectric complex. The black curve is the relief of the bottom [22]

Дополнительный приток наносов из зоны размыва в зону аккумуляции усилит заносимость предлагаемой прорези в пределах этой зоны, а также будет стимулировать процесс меандрирования, уже начавшийся в нижней части участка (880–894 км с. х.).

Развитие излучин приведет к смещению перекатов и искривлению оси судового хода, что, безусловно, ухудшит условия судоходства.

Требуются дополнительные предпроектные решения.

Вариантом решения вопроса могло бы стать создание устойчивой судоходной прорези в нижнем бьефе Городецкого гидроузла. Такой вариант предполагает оценку обоснованности расчетов устойчивости

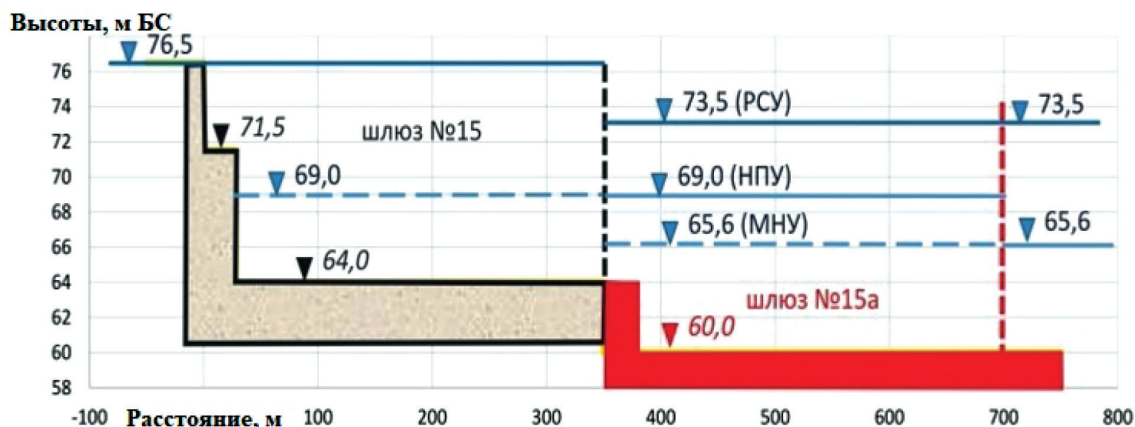


Рис. 15. Схематичный продольный разрез камер № 15 и № 15А. РСУ — расчетный судоходный уровень, НПУ — нормальный подпорный уровень, МНУ — минимальный навигационный уровень

Fig. 15. Schematic longitudinal section of chambers № 15 and № 15А. The RSU is the estimated navigable level, the NPU is the normal retaining level, the MNU is the minimum navigational level

судоходной прорези и расчетов объемов необходимых первоначальных и эксплуатационных дноуглубительных работ на основе математической модели Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева [21]. Вместе с тем использованная математическая модель не учитывает дискретного характера движения донных наносов (образования осередков, побочной и ленточных гряд). Требуется проведение дополнительных исследований форм движения в проектируемой прорези и методов регулирования судоходных условий для каждого лимитирующего участка.

3.3. Строительство в составе Городецких шлюзов дополнительной камеры

Технические характеристики рассматриваемого варианта (рис. 15).

Камера докового типа с водонепроницаемыми железобетонными днищем и стенами (полезная ширина — 30 м, полезная длина — 300 м, проектная отметка дна — 60,0 м БС).

Двухкамерный шлюз № 15–15А Городецкого гидроузла предназначен для пропуска судов и поддержания подпорного уровня воды.

Нижний подходный канал Городецкого гидроузла и судоходный канал на участке внутренних водных путей (ВВП) от 854,5 до 895,0 км судового хода предназначены для создания нормальных судоходных условий на участке внутреннего водного пути, с гарантированными глубинами 4,0 м в течение навигационного периода.

Основные недостатки рассматриваемого варианта:

- снижение пропускной способности гидроузла;
- необходимость создания судоходной прорези в нижнем бьефе гидроузла (см. раздел 3.2);
- отсутствие проектной документации.

4. Сравнение вариантов

4.1. Экологические и санитарно-гигиенические условия

Решение проблемы обеспечения экологических и санитарно-гигиенических условий при различных вариантах требовало выполнения соответствующей экспертной оценки методом сравнительного анализа.

В результате были получены следующие результаты воздействий на объекты экосистемы (оценивалась степень отрицательного воздействия в баллах) (рис. 16).

4.2. Водные биоресурсы (ВБР)

Единственным критерием достоверности и репрезентативности любой количественной оценки влияния на ВБР (в натуральных и стоимостных показателях) намечаемого варианта деятельности является

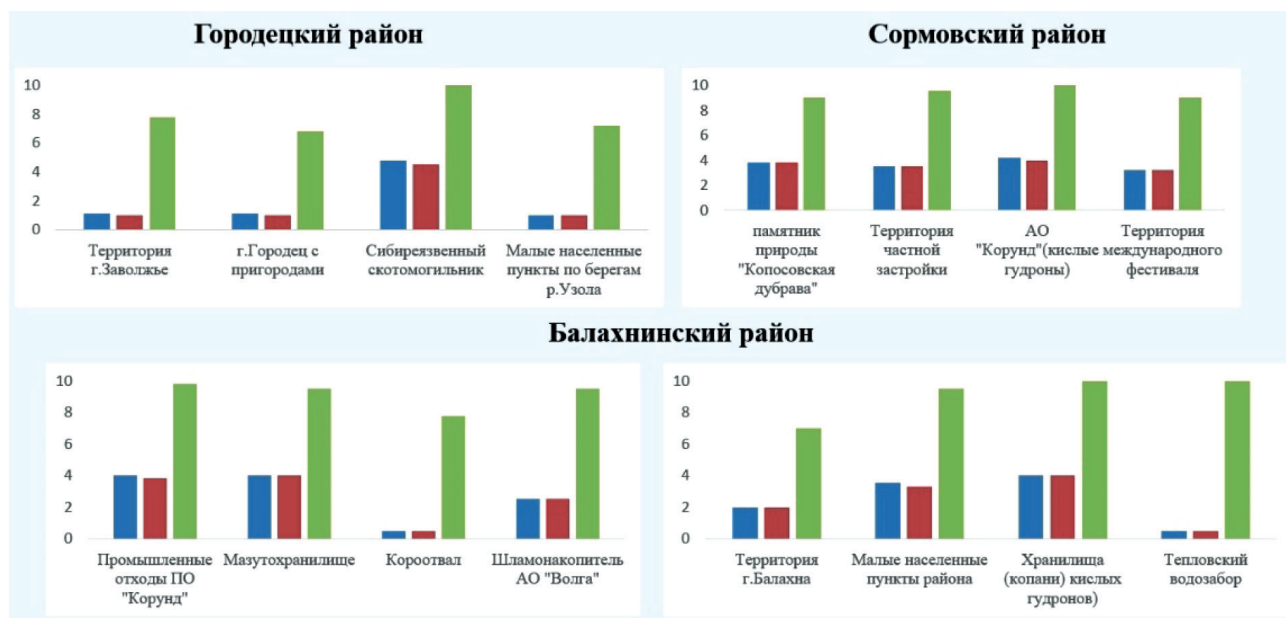


Рис. 16. Результаты воздействий на объекты экосистемы (степень отрицательного воздействия в баллах от 0 до 10): синий цвет — камера № 15А, красный цвет — 3-я нитка, зеленый цвет — ННГУ

Fig. 16. Results of impacts on ecosystem objects (degree of negative impact in points from 0 till 10): the blue color is camera No. 15A, the red color is the 3rd thread, the green color is the Nizhny Novgorod low-pressure waterworks

полученное в установленном законодательством порядке согласование Федерального агентства по рыболовству либо его территориального управления. Исходя из этого, а также с учетом методических изменений 2021 г. в расчетные положения при оценке размера вреда ВБР и различной степени детализации проектных решений [30], возможно лишь качественное экспертное сравнение рассматриваемых вариантов.

Классификация степени и характера негативного воздействия на ВБР при реализации различных вариантов приведена в соответствии с действующими критериями, установленными Приказом Росрыболовства от 06.05.2020 № 238 «Об утверждении Методики определения последствий негативного воздействия...» [31].

Влияние различных вариантов решения на водные биоресурсы представлено в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Влияние различных вариантов решения на биоресурсы

The impact of various solutions on bioresources

Строительство Низконапорного Гидроузла
В зоне воздействия находятся: • верхний речной отдел Чебоксарского водохранилища на протяжении 40 км; • 6 малых рек первой рыбохозяйственной категории и 9 малых рек и ручьев второй рыбохозяйственной категории; • более 100 пойменных озер и водных объектов искусственного происхождения второй рыбохозяйственной категории; • 3 пойменных и 2 русловых нерестилища, в том числе ценного вида ВБР — стерляди, 2 зимовальные ямы.
Результат: • изменение видового состава и продуктивности рыбного сообщества верхнего отдела Чебоксарского водохранилища на протяжении 40 км; • нарушение путей миграции рыб из других отделов водохранилища, ухудшение условий нереста на пойменных и русловых нерестилищах; • уничтожение поймы и пойменных озер острова Ревякский при размещении постоянных сооружений, уничтожение поймы реки Волги при инженерной защите берегов; • ухудшение гидрохимического режима и эпизоотической обстановки — увеличение смертности рыб в результате повышения заболеваемости и «цветения» воды; • временное нарушение русла при дноуглубительных работах по обеспечению судоходства на протяжении 9,1 км (гибель планктонных и бентосных организмов).

Окончание табл. 2

Fin table 2

<i>Воздействие масштабное, максимальное. Вред в полном объеме не определим. Частичная компенсация возможна только при создании объекта по искусственному воспроизводству ВБР.</i>	
Строительство третьей нитки шлюзов	
В зоне воздействия находятся: • антропогенно измененные объекты: межшлюзовой бьеф и р. Змейка; • часть русла верхнего отдела Чебоксарского водохранилища шириной 100–150 м на протяжении 15 км судового хода; • 1 русловое нерестилище, в том числе ценного вида ВБР — стерляди, 1 зимовальная яма.	
Результат: • постоянная утрата антропогенно нарушенной поймы реки Волги в районе Нижегородского гидроузла, части русел р. Змейка и межшлюзового бьефа; • временное нарушение русла при дноуглубительных работах по обеспечению судоходства на протяжении 15 км (гибель планктонных и бентосных организмов).	
<i>Воздействие минимальное, локальное. Вред поддается оценке и компенсации в полном объеме.</i>	
Реконструкция шлюзов № 15–16	
В зоне воздействия находятся: • антропогенно измененный нижний подходной канал и участок русла Чебоксарского водохранилища ниже него; • часть русла верхнего отдела Чебоксарского водохранилища шириной 100–150 м на протяжении 15 км судового хода; • 1 русловое нерестилище, в том числе ценного вида ВБР — стерляди, 2 зимовальных ямы.	
Результат: • постоянная утрата антропогенно нарушенной поймы реки Волги в районе Нижегородского гидроузла; • постоянная утрата русла нижнего подходного канала и русла реки Волги ниже него; • временное нарушение русла при дноуглубительных работах по обеспечению судоходства на протяжении 15 км (гибель планктонных и бентосных организмов); • полное необратимое изменение условий зимовки рыб (ликвидация зимовальной ямы в подходном канале).	
<i>Воздействие локальное, существенное. Вред поддается оценке и компенсации в полном объеме.</i>	

Основные характеристики

В качестве основных характеристик были выбраны показатели транспортной, экономической, социальной эффективности, энергетика и экологическая безопасность. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты сравнения вариантов проекта по основным характеристикам

Results of comparison of project options by main characteristics

Наименование	Строительство третьей нитки шлюзов	Реконструкция шлюзов № 15–16	Строительство ННГУ
Показатели транспортной эффективности			
Время судопропуска через шлюзы, мин	48	70	96
Пропускная способность шлюза, тыс. т.	42440,0	20300,0	15540,0
Потери судоходных компаний от простоев при прохождении шлюзов, млн руб./год	45	65	90
Энергетика			
Влияние на выработку электроэнергии Нижегородской ГЭС	нет	нет	Снижение составит ≈59 млн. кВтч (≈7,0 %) за навигационный период
Показатели экономической эффективности			
Продолжительность разработки и согласования проекта, годы*	1,5	2	1,5–2
Продолжительность строительства, мес*	29	60	58

Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги...
Solution options for problems of navigation on a limited section of the Volga River...

Окончание табл. 3

Fin table 3

Наименование	Строительство третьей нитки шлюзов	Реконструкция шлюзов № 15–16	Строительство ННГУ
Показатели экономической эффективности			
Продолжительность проектирования и строительства, годы*	4	7	7
Ориентировочная стоимость первоначальных инвестиций в относительных единицах	1	2	10
Показатели социальной эффективности			
Населенные пункты, попадающие в зону подтопления	нет	нет	10 населенных пунктов (95416 жителей)
Количество затопляемых дачных участков	нет	нет	≈2 тыс.
Затопление и подтопление объектов археологического и культурного наследия	нет	нет	37
Затопление земельных угодий, га	нет	нет	5265,0
Капитальные дноуглубительные работы, 10 ⁶ м ³	требуется уточнение	требуется уточнение	требуется уточнение
Ежегодные дноуглубительные работы, 10 ⁶ м ³	≈1	≈1	работы в нижнем бьефе, требуется уточнение
Потребность в дополнительном берегоукреплении и создании инженерной защиты территорий	нет	нет	требуется
Влияние на качество речной и питьевой воды	нет	нет	Качество ухудшится
Влияние на здоровье населения	нет	нет	Ухудшится санитарная и экологическая обстановка
Показатели экологической эффективности			
Влияние на состояние растительного мира	Незначительное	Незначительное	Существенное
Влияние на состояние животного мира	Незначительное	Незначительное	Существенное
Влияние на водные биологические ресурсы	Локальное, преимущественно временное, прогнозируемое, существенное	Локальное, временное и постоянное, прогнозируемое, существенное	Масштабное (субрегиональное), постоянное, непрогнозируемое, существенное

* Ориентировочные данные (по доступной исполнителям информации).

В ходе исследования было получено рейтинговое распределение вариантов решения проблемы судоходства по совокупности количественных и качественных показателей (табл. 4, 5).

Таблица 4

Table 4

Исходные количественные и качественные показатели для рейтингового распределения вариантов

Initial quantitative and qualitative indicators for the rating distribution of options

Наименование	Вес	ННГУ		Третья нитка шлюзов		Камера № 15А	
		Показатель	Рейтинг	Показатель	Рейтинг	Показатель	Рейтинг
Продолжительность навигации, сут	1,00	200,00	0,00	210,00	1,00	210,00	1,00
Время судопропуска через шлюзы, мин	6,00	96,00	0,00	48,00	6,00	70,00	3,25
Пропускная способность шлюзов, млн т	6,00	15,54	0,00	42,44	6,00	20,30	1,06

Окончание табл. 4

Fin table 4

Наименование	Вес	ННГУ		Третья нитка шлюзов		Камера № 15А	
		Показатель	Рейтинг	Показатель	Рейтинг	Показатель	Рейтинг
Потребность в объектах транспортной инфраструктуры (наличие = 0; отсутствие = 1)	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Потери судоходных компаний от простоев при прохождении шлюзов, млн руб./год	1,00	90,00	0,00	45,00	1,00	65,00	0,56
Продолжительность разработки и согласования проекта, годы	8,00	2,00	0,00	1,50	8,00	2,00	0,00
Продолжительность строительства, мес	9,00	58,00	0,58	29,00	9,00	60,00	0,00
Продолжительность проектирования и строительства, годы	1,00	7,00	0,00	4,00	1,00	7,00	0,00
Сметная стоимость первоначальных инвестиций, млрд руб.	10,00	102,00	0,00	11,00	10,00	21,00	8,90
Сметная стоимость ПИР, млрд руб.	9,00	2,76	0,00	0,20	9,00	0,40	8,30
Ущерб от вывода земель из оборота в связи с затоплением, млрд руб.	9,00	1,86	0,00	0,00	9,00	0,00	9,00

Таблица 5

Table 5

Рейтинговое распределение вариантов по совокупности количественных и качественных показателей

Rating distribution of options according to a set of quantitative and qualitative indicators

Краткое наименование	Рейтинг, баллы
Третья нитка шлюзов	10,00
Камера № 15А	5,00
ННГУ	1,00

5. Выводы и предложения

1. Лучшим из рассмотренных вариантов решения проблемы Городецких шлюзов является вариант строительства третьей нитки, существенно превосходящий по большинству наиболее важных характеристик другие варианты.

2. Представляется необходимым:

- при проведении предпроектных работ предусмотреть исследования гидрологических и гидрогеологических русловых процессов в интересах создания и обеспечения устойчивости судоходной прорези;
- при разработке проектной документации предусмотреть в отдельных разделах расчеты коммерческой, бюджетной и общественной (социально-экономической) эффективности в соответствии с действующими нормативно-методическими документами и мировой практикой.

3. В целях оптимизации технико-экономических характеристик проекта необходимо рассмотреть возможность повышения попусков Городецкого гидроузла и соответствующего изменения «Правил использования водных ресурсов...», что будет способствовать увеличению глубин и уменьшению объемов дноуглубительных работ при создании судоходной прорези.

4. Целесообразно пересмотреть приоритеты в политике развития перспективного водного транспорта в пользу строительства судов с малой осадкой.

5. Важным направлением в вопросе глубин на ЕГС может быть отказ от гарантированной глубины 4 м в пользу уменьшения глубины судового хода. Утверждение меньшей глубины в качестве гарантированной позволит в ближайшее время определить оптимальную сетку судов, минимизировать затраты при их строительстве и обеспечить их эффективную работу в процессе эксплуатации.

6. Заключение

В заключение отметим, что в октябре 2020 г. АО «Объединенная судостроительная корпорация» с целью беспрепятственного прохода через гидроузел судов с осадкой до 3,6 м предложила к рассмотрению вариант пристройки к одному из шлюзов нижней ступени Городецких шлюзов дополнительной камеры. На совещании в Минстрое России, состоявшемся 27 января 2021 г., это предложение было поддержано.

3 февраля 2021 г. Минэкологии Нижегородской области направило письмо в Минстрой России, в Минтранс России, в Росморречфлот, в Российскую академию наук и в ФАУ «Главгосэкспертиза России» о том, что не имеет принципиальных возражений против реализации данного варианта, однако окончательное решение необходимо принять по результатам технико-экономического сравнения вариантов.

В соответствии с п. 6 Протокола совещания у Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации М.Ш. Хуснуллина от 15.02.2021 г. [32] № МХ-П49–22пр в целях улучшения судоходных условий на участке внутренних водных путей от Городецких шлюзов № 15 и № 16 до г. Нижний Новгород был принят к реализации вариант строительства в составе Городецких шлюзов дополнительной камеры № 15А с **созданием судоходного канала от г. Городец до г. Нижний Новгород**. Минтрансу России (В.Г. Савельеву) совместно с Правительством Нижегородской области было поручено проработать возможность заключения государственного контракта, предметом которого одновременно является выполнение работ по проектированию и строительству. При этом проект ННГУ не исключен из государственной программы РФ «Развитие транспортной системы» и из Схемы территориального планирования РФ в сфере федерального транспорта.

По результатам проведенной НИР вариант строительства ННГУ признан худшим, что является подтверждением выводов отрицательного заключения государственной экспертизы. Лучшим из рассмотренных вариантов с точки зрения транспортной и экономической эффективности признан вариант строительства в районе Городецких шлюзов №№ 15–16 третьего параллельного шлюза (третья нитка) с созданием судоходной прорези (по показателям пропускной способности, стоимости реализации, сроков реализации и ряду других показателей). Эти выводы 2 июля 2021 г. были направлены Российской академией наук в Минтранс России, но поддержаны не были.

16 ноября 2021 г. ФБУ «Администрация Волжского бассейна» по поручению Росморречфлота разместило на сайте государственных закупок информацию о закупке «Выполнение работ по объекту: «Реконструкция судоходных шлюзов 15–16 Городецкого гидроузла, включая строительство дополнительной камеры шлюза, и создание судоходного канала от г. Городец до г. Нижний Новгород». Таким образом, принят к реализации вариант, который, согласно выводам НИР, не является оптимальным.

Проблемными вопросами остаются наличие проекта ННГУ в комплексном плане модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г., утвержденном распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 № 2101-р [33], и в Схеме территориального планирования РФ в области федерального транспорта, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 19.03.2013 № 384-р [34], а также отсутствие информации о планах Минтранса России и Росморречфлота по решению указанного вопроса и отсутствие оценки воздействия «судоходной прорези» на окружающую среду [35].

Для улучшения сложившейся ситуации в бассейне Волги на исследуемом участке стока воды требуется реализация целого комплекса увязанных между собой решений социально-экологического, инженерно-гидротехнического и финансово-экономического характера.

Прежде всего, необходимо установить Правила использования водных ресурсов волжских водохранилищ в соответствии с приоритетами водопользования, установленными Водным кодексом Российской Федерации. Также необходимо создать оптимальный научно обоснованный механизм управления водными ресурсами бассейна реки Волги.

Финансирование

Работа выполнена в рамках тем госзаданий: FMWE-2021-0014 (ИО РАН), FUFZ-2021-0002 (ИВЭП СО РАН), 075-00869-22-00 (СПбНЦ РАН), FFUF-2021-0007 (ИПФ РАН).

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignments: FMWE-2021-0014 (Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences), FUFZ-2021-0002 (Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), 075-00869-22-00 (St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences), FFUF-2021-0007 (FRC Institute of Applied Physics).

Литература

1. Кривошей В.А. О Чебоксарском водохранилище и Городецком шлюзе // Гидротехника. 2011. № 4 (25). С. 21–30.
2. Сулименко А.Г. Волга ждет своего возрождения // Труды 3-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2018»). Выпуск 1, 2018 г.
3. Орехов В.Ф. Об экологических проблемах Волжского бассейна и путях их решения // Труды 3-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2018»). Выпуск 1, 2018 г.
4. Каменский С.Б., Орехов В.Ф., Чуйков Ю.С. Волге необходимо возрождение // Астраханский вестник экологического образования. № 3 (33), 2015. С. 148–157.
5. Каменский С.Б., Чуразов А.Г. Сохранение проточного участка в Нижегородском Приволжье — важный шаг к возрождению Волги // Астраханский вестник экологического образования. № 1 (39), 2017. С. 110–121.
6. Распоряжение Совета Министров СССР от 08.01.1978 г. № 28-р об уточнении пускового комплекса.
7. Временные основные правила использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища на р. Волга (на период начальной эксплуатации). РВ-249–82, Минводхоз РСФСР, 1982.
8. Постановление Государственной экспертной комиссии Госплана СССР, Управления Государственной экспертизы Госстроя СССР и Главной государственной экологической экспертизы Госкомприроды СССР от 26.04.1989 г. № 7/76/79 о приостановке подъема водохранилища до определения оптимальной отметки водохранилища.
9. Распоряжение Правительства РФ от 12.03.1992 г. № 468-р «Об установлении подпорного уровня водохранилища Чебоксарской ГЭС». URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=222760#h-C5fHgS5jG5c0Qu1> (дата обращения: 15.10.2021).
10. Указ Президента Российской Федерации от 15.09.1992 г. № 1071 «О мерах по государственной поддержке социально-экономического развития Чувашской Республики».
11. Сводное заключение экспертной комиссии государственной экологической экспертизы Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации по «Технико-экономическому обоснованию Чебоксарского гидроузла с НПУ 63,0 м и повышения уровня водохранилища до отметки 65,0 м» от 7 августа 1995 г.; Решение Совета государственной экологической экспертизы Минприроды России по результатам государственной экологической экспертизы «Технико-экономического обоснования Чебоксарского гидроузла с НПУ 63,0 м и повышения уровня водохранилища до отметки 65,0 м» от 3 октября 1995 г. № 21.
12. Заключение экспертной комиссии государственной экологической экспертизы завершения разработки проектной документации «Строительство Чебоксарской ГЭС на реке Волге» в части, касающейся поднятия уровня Чебоксарского водохранилища до отметки нормального подпорного уровня 68 метров». Утверждено приказом Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 03.10.2013 г. № 611. URL: <http://npncsvr.ru/cheboksaruzel/5.pdf> (дата обращения: 20.10.2021).
13. Орехов В.Ф., Краснов А.Н. Проблемы Чебоксарского водохранилища «Проект 68» — прыжок с разбега на гигантские грабли // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 3 (25). С. 170–184.
14. Основные правила использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ на р. Волге. М.: Минмелиоводхоз, 1983. 52 с.
15. Распоряжение Росморречфлота от 17.12.2019 г. № АП-536-р.
16. Распоряжение Росморречфлота от 22.12.2020 г. № АП-605-р.
17. Распоряжение Росморречфлота от 27 декабря 2021 г. № АЛ-595-р «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2022 года».
18. Постановление Правительства РФ от 20.12.2017 г. № 1596 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы».
19. Распоряжение Правительства РФ от 19.03.2013 г. № 384-р «Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области федерального транспорта (железнодорожного, воздушного, морского, внутреннего водного транспорта) и автомобильных дорог федерального значения».
20. Отчет о НИР «Влияние строительства Нижегородского низконапорного гидроузла на работу Ново-Сормовской водопроводной станции АО «Нижегородский водоканал», включая анализ материалов проекта

- «Строительство нижегородского низконапорного гидроузла» и проведение исследований по рассмотрению возможности реализации альтернативного варианта обеспечения судоходных условий на участке р. Волги от шлюзов городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода и выполнение работ по графическому описанию местоположения границ зон санитарной охраны (ЗСО) поверхностных источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения объектов, эксплуатируемых АО «Нижегородский водоканал», определению координат характерных точек границ вышеуказанных зон». Этап 1 «Сбор исходных данных и анализ материалов проекта «Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла». СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2019.
21. То же. Этап 2 «Анализ гидрологической ситуации в районе расположения Ново-Сормовской водопроводной станции...». СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2019.
 22. То же. Этап 3 «Проведение комплекса научных исследований для альтернативных вариантов обеспечения судоходства». СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2019.
 23. То же. Этап 4. Книга 1. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2019.
 24. То же. Этап 4. Книга 2. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2019.
 25. Протокол заседания Научного совета Российской академии наук по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии от 10.04.2019 г.
 26. Протокол заседания Научного совета Отделения наук о Земле Российской академии наук «Водные ресурсы суши» от 28.05.2019 г.
 27. Протокол совещания «О вариантах обеспечения судоходства в нижнем бьефе Городецких шлюзов на реке Волге» в Совете Федерации Федерального Собрания Российской Федерации от 17.06.2019 г.
 28. Протокол совещания в Российской академии наук «О комплексных проблемах реконструкции (модернизации) объектов Волжско-Камского каскада ГЭС» от 30.01.2020 г.
 29. Отчет о НИР «Систематизация и анализ информации для выбора варианта проекта, предполагаемого к реализации на территории Нижегородской области, с целью решения проблем судоходства на реке Волге, в том числе с учетом оценки его влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе, зоны затопления и подтопления». СПб.: СПбФ ИО РАН, 2020. 278 с.; Отчет о НИР «Подготовка предложений по выбору варианта проекта, предполагаемого к реализации на территории Нижегородской области, с целью решения проблем судоходства на реке Волге, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе, зоны затопления и подтопления». СПб.: СПбФ ИО РАН, 2021. 446 с.
 30. Постановление Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».
 31. Приказ Росрыболовства от 06.05.2020 № 238 «Об утверждении Методики определения последствий негативного воздействия при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства, внедрении новых технологических процессов и осуществлении иной деятельности на состояние водных биологических ресурсов и среды их обитания и разработки мероприятий по устранению последствий негативного воздействия на состояние водных биологических ресурсов и среды их обитания, направленных на восстановление их нарушенного состояния». URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 30.03.2022).
 32. Протокол совещания под руководством Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации М.Ш. Хуснулина от 15.02.2021 г. № МХ-П49–22пр.
 33. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 № 2101-р.
 34. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.03.2013 № 384-р.
 35. Ежегодный доклад «Состояние окружающей среды Нижегородской области в 2021 году. Министерство экологии и природных ресурсов Нижегородской области. URL: <https://eco.52gov.ru/presscenter/lectures/49> (дата обращения: 02.04.2022).

References

1. Krivoshey V.A. About Cheboksary Reservoir and Gorodetsky sluice. *Hydrotechnika*. 2011, 4 (25), 21–30 (in Russian).
2. Sulimenko A.G. Volga is waiting for its revival. *Proc. III All-Russian Conference “Problemy Ekologii Volzhskogo Basseina” (“Volga-2018”)*. 2018, 1 (in Russian).
3. Orekhov V.F. About the environmental problems of the Volga Basin and their solutions. *Proc. III All-Russian Conference “Problemy Ekologii Volzhskogo Basseina” (“Volga-2018”)*. 2018, 1 (in Russian).
4. Kamenskiy S.B., Orekhov V.F., Chuikov Yu.S. The Volga revival is needed. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2015, 3 (33), 148–157 (in Russian).
5. Kamenskiy S.B., Churazov A.G. Maintaining the natural state of the flow of the Volga in Nizhny Novgorod — an important step towards the revival of the Volga. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2017, 1 (39), 110–121 (in Russian).

6. Order of the Council of Ministers of the USSR dated 08.01.1978 № 28-p on the specification of the launch complex (in Russian)..
7. Temporary basic rules for the use of water resources of the Cheboksary reservoir on the Volga River (for the period of initial operation). PB-249–82, MinvodhozRSFSR, 1982 (in Russian).
8. Resolution of the State Expert Commission of Gosplan of the USSR, the Department of State Expertise of Gosstroy of the USSR and the Main State Environmental Expertise of the State Committee of Nature of the USSR dated 04/26/1989 № 7/76/79 on the suspension of the rise of the reservoir until the optimal level of the reservoir is determined (in Russian).
9. Decree of the Government of the Russian Federation № 468-r dated 12.03.1992 “On the establishment of the retaining level of the Cheboksary Hydroelectric power Station reservoir”. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=222760#hC5fHgS5jG5c0Qu1> (date of access: 15.10.2021) (in Russian).
10. Decree of the President of the Russian Federation № 1071 dated 15.09.1992 “On measures for state support of the socio-economic development of the Chuvash Republic” (in Russian).
11. Summary conclusion of the expert commission of the State Ecological expertise of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation on the «Feasibility study of Cheboksary hydroelectric power plant with a 63.0 m NPU and raising the reservoir level to 65.0 m» dated August 7, 1995; Decision of the Council of the State Ecological Expertise of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation on the results of the state ecological expertise «Feasibility study of the Cheboksary hydroelectric power plant with a 63.0 m NPU and raising the reservoir level to 65.0 m» dated October 3, 1995 № 21 (in Russian).
12. The conclusion of the expert commission of the state ecological expertise of the completion of the development of the project documentation “Construction of the Cheboksary hydroelectric power station on the Volga River in terms of raising the level of the Cheboksary reservoir to the level of the normal retaining level of 68 meters”. Approved by the Order of the Federal Service for Supervision of Nature Management dated 03.10.2013 № 611. URL: <http://npncvp.ru/cheboksaruzel/5.pdf> (date of access: 20.10.2021) (in Russian).
13. Orekhov V.F., Krasnov A.N. The problems of the Cheboksary Reservoir “Project 68” — a jump from a running start to a giant rake. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2013, 3 (25), 170–184 (in Russian).
14. Basic rules for the use of water resources of the Rybinsk and Gorky Reservoirs on the river Volga. *Moscow, Minmeliovodkhoz*, 1983, 52 p. (in Russian).
15. Rosmorrechflot Order № AP-536-r dated 17.12.2019 (in Russian).
16. Rosmorrechflot Order № AP-605-r dated 22.12.2020 (in Russian).
17. Rosmorrechflot Order № AL-595-r dated December 27, 2021 “On the Establishment of Categories of Inland Waterways that Determine for Sections of Inland Waterways the Dimensions of Ship Passages and navigation and hydrographic provision of navigation conditions for Ships, the list of ship passages, as well as the terms of operation of navigation equipment and navigable Hydraulic structures in the navigation of 2022” (in Russian).
18. Resolution of the Government of the Russian Federation dated 20.12.2017 № 1596 “On approval of the State program of the Russian Federation Development of the transport system” (in Russian).
19. Decree of the Government of the Russian Federation № 384-r dated 19.03.2013 “On Approval of the Territorial Planning Scheme of the Russian Federation in the Field of federal transport (Rail, Air, sea, inland waterway Transport) and highways of Federal significance” (in Russian).
20. Research report «The impact of the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric power plant on the operation of the Novo-Sormovskaya water supply station of Nizhny Novgorod Vodokanal JSC, including analysis of the materials of the project “Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric power plant” and conducting studies to consider the possibility of implementing an alternative option to ensure navigable conditions on the Volga River section from the locks of the Gorodetsky hydroelectric power plant to Nizhny Novgorod and the execution of works according to the graphic description of the location of the boundaries of the sanitary protection zones (ZSO) of surface sources of drinking and household water supply facilities operated by JSC Nizhny Novgorod Vodokanal, determining the coordinates of the characteristic points of the boundaries of the above zones». Stage 1. Collection of initial data and analysis of materials of the project “Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric power plant”. SPb.: VNIIG named after B.E. Vedenev, 2019 (in Russian).
21. The same. Stage 2 “Analysis of the hydrological situation in the area of the Novo-Sormovskaya waterworks...”. SPb., B.E. Vedenev VNIIG, 2019 (in Russian).
22. The same. Stage 3 “Conducting a complex of scientific research for alternative options for ensuring navigation”. SPb., B.E. Vedenev VNIIG, 2019 (in Russian).
23. The same. Stage 4. Book 1. SPb., B.E. Vedenev VNIIG, 2019 (in Russian).
24. The same. Stage 4. Book 2. SPb., B.E. Vedenev VNIIG, 2019 (in Russian).
25. Minutes of the meeting of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology dated 10.04.2019 (in Russian).

26. Minutes of the meeting of the Scientific Council of the Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences "Land Water Resources" dated 28.05.2019 (in Russian).
27. Minutes of the meeting "On options for ensuring navigation in the lower reaches of Gorodetsky locks on the Volga River" in the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation dated 17.06.2019 (in Russian).
28. Minutes of the meeting at the Russian Academy of Sciences «On complex problems of reconstruction (modernization) of objects of the Volga-Kama cascade of hydroelectric power plants» dated 30.01.2020 (in Russian).
29. Report "Systematization and analysis of information for selecting a project option to be implemented in the Nizhny Novgorod region in order to solve the problems of navigation on the Volga River, including taking into account the assessment of its impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region, flooding and flooding zones". SPb.: SPbF IO RAS, 2020. 278 p.; Report "Preparation of proposals for the selection of a project option to be implemented in the Nizhny Novgorod region in order to solve the problems of navigation on the Volga River, including taking into account the assessment of the impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region, flooding and flooding zones". SPb.: SPbF IO RAS, 2021. 446 p. (in Russian).
30. Decree of the Government of the Russian Federation № 87 dated February 16, 2008 "On the composition of sections of project documentation and requirements for their content" (in Russian).
31. Rosrybolovstvo Order № 238 dated 05/06/2020 "On Approval of the Methodology for Determining the Consequences of Negative Impacts during Construction, Reconstruction, Overhaul of Capital Construction Facilities, Introduction of New Technological Processes and Other Activities on the State of Aquatic Biological Resources and Their Habitat and Development of Measures to Eliminate the Consequences of Negative Impacts on the State of Aquatic Biological Resources and their Environment habitat, aimed at restoring their disturbed state". URL: <http://www.consultant.ru/> (date of access: 30.03.2022) (in Russian).
32. Minutes of the meeting under the leadership of the Deputy Chairman of the Government of the Russian Federation M. Sh. Khusnullin dated 02/15/2021 № MX-P49–22pr. (in Russian)
33. Order of the Government of the Russian Federation № 2101-r dated 30.09.2018 (in Russian).
34. Resolution of the Government of the Russian Federation № 384-r dated 19.03.2013 (in Russian).
35. Annual report "The state of the environment of the Nizhny Novgorod region in 2021". Ministry of Ecology and Natural Resources of the Nizhny Novgorod region. URL: <https://eco.52gov.ru/presscenter/lectures/49> (date of access: 02.04.2022) (in Russian).

Об авторах

РОДИОНОВ Анатолий Александрович, член-корреспондент РАН, РИНЦ AuthorID: 13746, ORCID: 0000–0002–2377–5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru

РУМЯНЦЕВ Владислав Александрович, академик РАН, РИНЦ AuthorID: 61498, e-mail: rum.ran@mail.ru

ФЁДОРОВ Михаил Петрович, академик РАН, РИНЦ AuthorID: 108184, e-mail: m.fedorov@spbstu.ru

ЗИНОВЬЕВ Александр Тимофеевич, доктор технических наук, РИНЦ AuthorID: 61205, ORCID: 0000-0003-4973-2803, Scopus AuthorID: 56071368100, WoS ResearcherID: S-8898-2016, e-mail: lgg-iwep@yandex.ru

КРИВОШЕЙ Владимир Александрович, доктор технических наук, vilxxi@yandex.ru

МЕДВЕДЕВА Ольга Евгеньевна, доктор экономических наук, РИНЦ AuthorID: 661732, e-mail: medvedeva_o@list.ru

ТРОИЦКАЯ Юлия Игоревна, доктор физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 60184, e-mail: yuliyatrinity@mail.ru

ДЁМИН Сергей Петрович, кандидат технических наук, e-mail: dspdmb@mail.ru

МАЛОВА Татьяна Игоревна, кандидат географических наук, РИНЦ AuthorID: 155138, Scopus AuthorID: 6507606822, e-mail: malova.ti@yandex.ru

МОИСЕЕВ Алексей Владимирович, РИНЦ AuthorID: 244530, e-mail: almois@mail.ru

ЧУСОВ Александр Николаевич, кандидат технических наук, РИНЦ AuthorID: 161099, e-mail: chusov17@mail.ru

ШИШКИНА Ольга Дмитриевна, кандидат технических наук, AuthorID (РИНЦ): 58740. E-mail: olsh63@mail.ru

КАМЕНСКИЙ Сергей Борисович, e-mail: ua3taf@yandex.ru

КРАЕВ Иван Михайлович, РИНЦ AuthorID: 1133945, e-mail: yuliyatrinity@mail.ru

МАРУСИН Константин Валерьевич, РИНЦ AuthorID: 166469, e-mail: kat@iwep.ru

УДК 913

© Т. И. Малова^{1*}, А. А. Родионов^{1,2}, 2022

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

²Санкт-Петербургский научный центр РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 5

*malova.ti@yandex.ru

КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ НАВОДНЕНИЕ НЕВЫ 10 (21) СЕНТЯБРЯ 1777 г. ТАК В КАКИХ ЖЕ ФУТАХ ОНО БЫЛО ИЗМЕРЕНО...

Статья поступила в редакцию 18.05.2022, после доработки 14.11.2022, принято в печать 28.11.2022

Аннотация

Высота одного из самых выдающихся наводнений Невы 10 (21) сентября 1777 г. практически не запечатлена на стенах зданий и сооружений Санкт-Петербурга. В данном контексте абсолютно уникальным и очень актуальным представляется нивелирный каталог, в котором отражены более 700 меток высот этого наводнения, и планы с расположением этих меток в пределах Санкт-Петербурга. Автор каталога — Фридрих Вильгельм Бауер, генерал-квартирмейстер, геодезист, картограф. Работы по нивелированию затопленных городских территорий были проведены по повелению Екатерины II. В нивелирном каталоге Ф.В. Бауер отмечает, что максимальная высота подъема воды в наводнение 1777 г. достигала 10 футов 3 дюйма, измерялась она от ординара Адмиралтейского футштока. Для измерения превышений Ф.В. Бауером использовалась французская линейная мера. Это позволило пересчитать максимальную высоту наводнения до значения 333 см.

Ключевые слова: Ф.В. Бауер, катастрофическое наводнение 10 (21) сентября 1777 г., французская линейная мера, ординар Адмиралтейского футштока, отметки высот наводнений

© Т. И. Малова^{1*}, А. А. Родионов^{1,2}, 2022

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

²St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Universitetskaya Nab., St. Petersburg, 199034, Russia

*malova.ti@yandex.ru

THE CATASTROPHIC FLOOD OF THE NEVA, SEPTEMBER 10 (21), 1777. SO, IN WHAT FEET IT WAS MEASURED...

Received 18.05.2022, Revised 14.11.2022., Accepted 28.11.2022

Abstract

The height of one of the most outstanding floods of the Neva on September 10 (21), 1777 is practically not captured on the walls of buildings and structures in St. Petersburg. In this context, the leveling catalog, which reflects more than 700 height marks of this flood, and plans with the location of these marks within St. Petersburg, seems to be absolutely unique and very relevant. The author of the catalog is Friedrich Wilhelm Bauer, quartermaster general, surveyor, cartographer. Work on leveling the flooded urban areas was carried out at the behest of Catherine II. In the leveling catalog of F.V. Bauer notes that the maximum height of the water in the flood of 1777 reached 10 feet 3 inches and that it was measured from the ordinary of the Admiralty footstock. To measure excess F.V. Bauer used the French linear measure, which made it possible to recalculate the maximum flood height to a value of 333 cm.

Keywords: F.V. Bauer, catastrophic flood of September 10 (21), 1777, French linear measure, Admiralty footstock ordinari, flood height marks

Введение

Удивительная история. Высота одного из самых выдающихся, относящихся к категории катастрофических наводнений Невы, случившегося 245 лет назад, 10 (21) сентября 1777 г., практически не запечатлена на стенах зданий и сооружений Санкт-Петербурга. Мы привыкли видеть памятные доски, но в боль-

Ссылка для цитирования: Малова Т.И., Родионов А.А. Катастрофическое наводнение Невы 10 (21) сентября 1777 г. Так в каких же футах оно было измерено... // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 132–139. doi:10.48612/fpg/ex7e-unv4-xd1r

For citation: Malova T.I., Rodionov A.A. The catastrophic flood of the Neva, September 10 (21), 1777. So, in what feet it was measured... *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 132–139. doi:10.48612/fpg/ex7e-unv4-xd1r

шинстве своем они посвящены двум другим потопам — 7 (19) ноября 1824 г. и 23 сентября 1924. Отметки наводнения 1777 г. тоже были, и немало — около 700 временных [1–4] (число постоянных выяснить не удалось), но до наших дней дошла лишь одна, расположенная во внутреннем пространстве Невских ворот Петропавловской крепости на одной мраморной плите с отметкой наводнения 23 октября (3 ноября) 1752 г. (рис. 1).

В представленной работе использован метод историко-географического анализа наводнений Невы XVIII в., теоретическая направленность которого заключается в сборе данных для оценки состояния высотной основы, используемой для привязки конкретных наводнений к тому или иному ординару.

Если рассматривать описания наводнения 10 (21) сентября 1777 г., то они, безусловно, заслуживают внимания, так как противоречий в интерпретации значения максимального подъема воды — множество.

В.Л. Крафт, академик, математик и физик, дает следующую характеристику: «В продолжение сего Юго-Западного ветра вода в реке так поднялась, что в начале шестаго часа утра она выступила уже из берегов и быстрым своим разлитием покрыла скоро большую часть города, а наипаче Васильевской и Санкт-петербургской острова. Вода казалось несшихся к верху, и подымалась довольно равномерным прибыванием до самой большой ея высоты, до 10 футов и 7 дюймов Аглинской меры (до 323 см — *Т.М., А.Р.*), выше обыкновенной ея высоты» [5].

Уильям Тук, английский писатель, член Лондонского королевского общества и Вольного экономического общества в Петербурге, писал, что наводнение 1777 г., очевидцем которого ему пришлось стать, «превышало все предшествовавшие, и продолжалось всю ночь с 9 на 10 сентября... при необыкновенно низком показании барометра... Вода поднялась более чем на 10 футов над обыкновенным уровнем реки, и на 1.5 фута выше, чем в 1752 г.» [6].

И.Г. Георги и В.Н. Берх также приводят сведения о наводнении 10 сентября и подъеме воды в Неве на 10 футов 7 дюймов [7, 8]. В.Н. Берх в своем труде ссылается на У. Тука.

Информация С.И. Аллера несколько отличается от других: «В 1777 году Сентября 10 в три часа после полуночи вода поднялась на 9 футов 10 дюймов (300 см — *Т.М., А.Р.*)» [9].

В 1839 г. И. Пушкирев писал о наводнении 10 сентября с высотой поднятия уровня Невы «более 10 фут» (более 305 см — *Т.М., А.Р.*) [10].

Сохранилась запись в Летописях Петропавловской крепости: «10 Сентября было сильное наводнение, вода поднималась на 10 фут 7 дюйм... Наводнение это, до случившагося в 1824 году, почиталось значительнейшим из всех бывших в С. Петербурге со времени его основания» [11].

В 1898 г. М.А. Рыкачев также отметил высоту наводнения 20–21 сентября, равную 10 футам 7 дюймам [12].

Такую же высоту определил в 1925 г. Б.П. Мультиановский: «Бедственность наводнения 21 сентября 1777 г. объясняется, помимо высоты (10 ф. 7 дм.), необычайною быстротою подъема и ранним часом дня» [13].

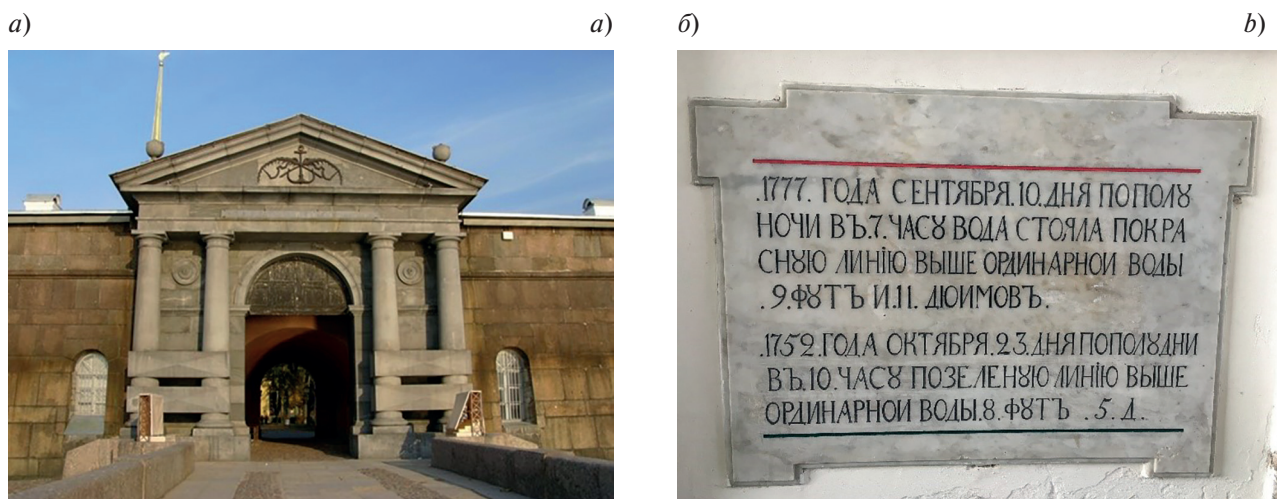


Рис. 1. Петропавловская крепость: а — Невские ворота; б — единственная сохранившаяся до настоящего времени отметка высоты наводнения 1777 г. (фото 2022 г.)

Fig. 1. Peter and Paul Fortress: а — Nevsky Gates; б — the only existing mark of the height of the flood of 1777 (photo taken in 2022)

В данном контексте абсолютно уникальным и очень актуальным представляется нивелирный каталог, в котором отражены более 700 меток высот наводнения 10 (21) сентября 1777 г., и планы с расположением этих меток в пределах Санкт-Петербурга [1–4]. Автор каталога — Фридрих Вильгельм Бауер, генерал-квартирмейстер, геодезист, картограф, изначально — военный инженер на службе Фридриха Великого. В 1769 г. он прибыл в Россию по приглашению Екатерины II [14–17]. Работы по нивелированию затопленных городских территорий были проведены по повелению Екатерины II, и именно поэтому ей впоследствии Ф.В. Бауером был подарен парадно оформленный комплект каталога и плана.

Однако в ходе проведенных исследований выяснилось, что комплектов каталогов и планов Ф.В. Бауером было составлено несколько — как минимум, два: один хранится в Государственном музее истории Санкт-Петербурга — Петропавловской крепости (ГМИ СПб), другой — в Российской государственном военно-историческом архиве в Москве (РГВИА). Какой из них первичен, какой вторичен, какой из них был преподнесен Императрице, и нет ли еще сохранившихся комплектов в других архивных собраниях — на эти вопросы пока ответов нет.

Планы, хранящиеся в ГМИ СПб и РГВИА, при общей схожести (элементы содержания идентичны), несколько отличаются друг от друга. Любопытным представляется тот факт, что на них — разные картуши. Причем разница не только композиционная, но и смысловая. Доминирующая фигура картуша плана ГМИ СПб — аллегорическое изображение Екатерины II в образе Афины, позади которой изображена экспрессивная сцена наводнения Санкт-Петербурга. На картуше плана РГВИА представлен вид Петропавловской крепости, причем в тихую погоду, без каких-либо указаний на наводненческую ситуацию.

На титуле копии каталога, хранящейся в ГМИ СПб, указаны: 1779 г. — год окончания нивелирных работ Ф.В. Бауера, 1795 г. год завершения перевода каталога с «иностранных языков на русский» с дополнениями И. Липгарта. Из «Предупреждения» к этой копии мы узнаем, что перевод осуществлен по указанию «Монархини»; что переводчик «сколько мог» придерживался подлинника; и что в целях удобного поиска домов с метками высот наводнений, в процессе последующих работ, И. Липгарт уточнил каталог и план сведениями о новых номерах домов, а также о их новых владельцах [1, 3]. Аналогичные сведения содержатся в экземпляре, хранящемся в РГВИА [2, 4].

«До вступления в разбирательство сего дела, заметить наперед нужно, — сообщается в “Предупреждении” к каталогу [1], — что в сем нивелировании за первую горизонтальную линию принята высота ординарной воды реки Невы по наблюдениям сделанным от Адмиралтейства; а за вторую горизонтальную линию принята высота самой большой воды примеченной во время бывшего ея наводнения 10^{го} сентября 1777^{го} года. Между сими двумя пределами избраны многия станции принадлежащая разным частям составляющим град Санкт Петербург. Места, где для нивелирования избраны станции, показаны на карте цифрами, а в книге сей таким образом: в первых трех графах означено каждой станции возвышение над ординарною водою, а в последующих трех графах означено помянутых мест унижение в сравнении горизонтальной линии высоких вод во время наводнения бывшего 10^{го} сентября 1777^{го} года.

При всякой станции помянутая большая вода означена черною толстою горизонтальною чертою. Ежели же паче чаяния или от древности времен или от суровости воздуха и разных непогод оные черты изгладятся, то, помощью сей книги можно их удобно паки отискать; ибо, высота ординарной воды Невы единожды и с точностию определена наблюдениями Адмиралтейства; и следственно посредством сложения или вычитания цифр в сей книге означенных против каждой станции, можно узнать ея возвышение и унижение во всякое время. Для избежания же дальней затруднительности можно сие произвести еще и таким образом: надлежит на камнях находящихся в стенах каналов города или нарочные поставить или вырубить знаки, которые ясно показывать будут высоту означенных вод. На пример: Поставим мы в стене канала знак **О**. Есть ли вода будет ниже знака то, сие называется унижением, есть ли же выше, то возвышением против ординарной или обыкновенной воды. И так расстояние первой горизонтальной линии со второю на 10 фут и 3 дюйма может каждого и во всякое время уведомить, в каком положении находится станция.

Сверх сих нужных предосторожностей дабы не сделать погрешностей в нивелировании надобно приложить тщание и к тому, чтоб между различными станциями с точностию заприметить как долготу так и широту. Таким образом поступив удобно будет изчислить различие мнимой от истинной горизонтальной линии следующим порядком» [1] (рис. 2).

Ф.В. Бауер оценивает величину $x\Gamma$ в предположении реальной малости центрального угла АСГ в треугольнике АСГ. Обозначая радиус Земли через $a = CA = Cx$, отрезок касательной АГ (в точке наблюдения на поверхности Земли) через $b = A\Gamma$ — угловое расстояние точки Γ , для которой оценивается в сфериче-

ском приближении искомое отличие «мнимого горизонта от истинного», имеем из прямоугольного треугольника: $a^2 + b^2 = (a + x\Gamma)^2$, разлагая которое в ряд Тейлора, получим, что $x\Gamma = C\Gamma - Cx = a + b^2/2a - a = b^2/2a$. Полагая диаметр Земли равным 6538584 французским туазам, согласно Ж. Пикару (XVII в.), а $Ax \approx A\Gamma = 800$ туазам, получим разность $x\Gamma = b^2/2a = 0,0979$ французских туазов или 7^{mi} дюймам и $3/5$ линии (французская футовая мера: $0,0979$ туазов = $0,5874' = 7,049'' = 19,1$ см).

Далее в «Предупреждении» следует: «Нивелирование выполнено “только в тех местах города кои подвержены были наводнению в 1777^m году, а которых мест по их высокому положению вода не касалась те не были нарочито нивелированы. И так на карте назначенная красная пунктированная черта показывает пределы мест во время наводнения водою покрытых».

На конец достойно примечания и то, что нивелирование производимо было в доль по улицам против домов, и следственно надобно вычесть падение находящееся посреди улиц, ибо, таковое падение по их пространству во многих местах бывает не равно.

Течение воды или падение улиц смотря по различному их протяжению означается на карте стрелою, и в приложенном при сем описании оставлено пустое место между номерами для означения перемен могущих со временем последовать; как то видно под № : 170^m, 174^m, 138^m, 140^m, 33^m, 35^m и проч.”» [1].

Необходимо подчеркнуть, что нивелирные определения высот более 700 меток катастрофического наводнения 10 (21) сентября 1777 г. выполнены Ф.В. Бауером не только в связи с перспективными научно-методическими целями, но и с сугубо практическими задачами определения объемов подсыпки грунта для поднятия низменных территорий города, чтобы они не были подвержены затоплениям в дальнейшем.

Любопытным представляется следующая находка. В нивелирных каталогах Ф.В. Бауер отмечает, что максимальная высота подъема воды в наводнение 1777 г. достигала 10 футов 3 дюймов и что измерялась она от ординара Адмиралтейского футштока. Для измерения расстояний использовалась российская 7-футровая саженная мера, принятая в России при Петре I, и названная Ф.В. Бауером «английским туазом», а для превышений, судя по записи высот наводнения 1777 г., для которых приведены значения в футах, дюймах и линиях, — французская линейная мера, в которой в 1 дюйме содержится 12 линий (в английской и российской футовых мерах 1 дюйм = 10 линиям (скрупулам)). На рисунке 3 продемонстрирована выкопировка из нивелирных каталогов, хранящихся в ГМИ СПб и РГВИА, наглядно демонстрирующая, что Ф.В. Бауер имел дело с французской линейной мерой: сложение значений Н над ординаром и Н ниже максимальной высоты дает в сумме 10 футов 3 дюйма с учетом того, что линий в дюйме не 10, а 12.

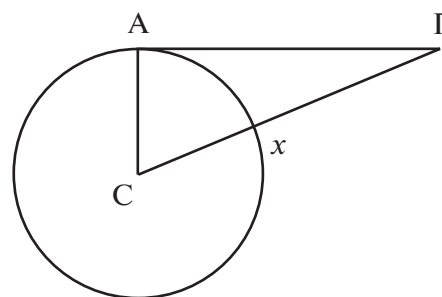


Рис. 2. Соотношение «мнимого» горизонта (визирного луча АГ) и действительной уровенной поверхности («истинного горизонта» — дуги Ax), по Ф.В. Бауеру [1]

Fig. 2. The ratio of the «imaginary» horizon (sighting beam AG) and the actual level surface («true horizon» — arc Ax), according to F.W. Bauer [1]

№	Адреса меток наводнения	Высоты (Н)					
		ГМИ СПб и РГВИА					
		Н _{над ординаром}			Н _{ниже Н макс}		
	Новая Исаакиевская улица	ф.	д.	л.	ф.	д.	л.
1	Дом генерального штаба, на углу	6	5	—	3	10	—
2	Дом Виснихорского, на углу	6	1	—	4	2	—
3½	Немецкая баня, у лавки	7	1	6	3	1	6
4½	Дом графа Ягузинского	7	4	—	2	11	—
4	Дом придворных певчих	7	5	—	2	10	—
3	Куркинской монастырской дом	7	7	—	2	8	—
9	Дом Пуговишника	7	4	10	2	10	2
10	Дом обершталмейстера Нарышкина	8	6	—	1	9	—
13	Питейной дом напротив церкви	7	1	6	3	1	6
14	Дом купца Поггенполя	8	0	3	2	2	9
15	Дом Мещерского	7	3	—	3	—	—
16	Дом купца Струговщикова	7	5	—	2	10	—
17	Дом Талызина	7	9	10	2	5	2
18	Дом Пистера	8	—	—	2	3	—
50	Дом советника Ибрика	7	9	6	2	5	6

Рис. 3. Выкопировка из нивелирных каталогов, хранящихся в ГМИ СПб и РГВИА, из которой следует, что в своих расчетах Ф.В. Бауер пользовался французской линейной мерой [1, 2]

Fig. 3. A copy from the leveling catalogs stored in the St. Petersburg GMI and RGVIA, from which it follows that in his calculations F.W. Bauer used the French linear measure [1, 2]

Таблица
Table

Сведения о ветре и максимальной высоте наводнения Невы 1777 г.
Information about the wind and the maximum height of the Neva flood in 1777

Автор, год завершения рукописи или публикации сведений, ссылки на источники	Ветер	$H_{\text{ОАФ}}$, ф. д. = см	$H_{\text{ОРМ}}$, ф. д. = см	$H_{\text{ОГИ}}$, см	$H_{\text{НКФ}}$, см БС
И.Г. Чернышев, Екатерина II, 1777 г. [8]	—	10'6"=320	Англ. фут. мера		
Э.И. Шретер, 1780, 1795 гг. [5, 18]	ЮЗ	—	10'7"=323	—	—
Ф.В. Бауер, 1779 г. [1–4]	—	10'3"=333	Франц. фут. мера		
В.Л. Крафт, 1780, 1795 гг. [5, 18]	ЮЗ	—	10'7"=323	—	—
И.Г. Георги, 1790, 1794 гг. [7, 19]	ЮЗ	10'7"=323	—	—	—
У. Тоук, 1799 г. [6]	ЮЗ	>10'=>305	—	—	—
В.Н. Берх, 1826 г. [8]	ЮЗ	10'7"=323	—	—	—
С.И. Алер, 1826 г. [9]	ЮЗ	10'6"=320	—	—	—
П.П. Каратыгин, 1889 г. [20]	ЮЗ	10'6"=320	—	—	—
М.А. Рыкачев, 1898 г. [12]	ЮЗ	10'7"=323	—	—	—
А.И. Мордухай-Болтовской, 1932 г. [21]	—	10'7"=323	—	310	323
Д.О. Святский, 1933 г. [22]	—	10'7"=323	—	310	—
М.С. Грушевский, Н.Н. Лазаренко, 1957 г. [23]	—	—	—	310	—
Р.А. Нежиховский, 1988 г. [24]	—	—	—	—	321
К.С. Померанец, 1998–2009 гг. [25–29]	—	10'7"=323	—	—	321

Примечание: Использованы системы отсчета высот от ординаров: ОАФ — Адмиралтейского футштока; ОРМ — на реке Мойке; ОГИ — у Горного института; от НКФ — нуля Кронштадтского футштока и в Балтийской системе высот (БС).

Note: Height reference systems from ordinars were used: OAF — Admiralty footstock; ORM — on the Moika River; OGI — at the Mining Institute; from the NKF — zero of the Kronstadt footstock and in the Baltic system of heights (BS)

Французские фут и дюйм больше английских, они соотносятся как 16:15. Таким образом, можно говорить о пересчете принятой максимальной высоты наводнения 10 (21) сентября 1777 г. в изложении Ф.В. Бауера.

В таблице приведены сведения о ветрах и максимальных высотах этого наводнения по материалам различных публикаций, начиная с 1777 г.

Закключение

Таким образом, новые сведения и идеи, привнесенные Ф.В. Бауером в решение проблемы инструментальной регистрации высот такого природного феномена как наводнения Невы, можно сформулировать в следующем виде:

1) Уточнена высота максимального подъема уровня Невы во время катастрофического наводнения Невы 10 (21) сентября 1777 г. Оценка ее над ординаром Адмиралтейского футштока оказалась равной 10 футам и 3 дюймам во французской футовой мере ($H_{\text{ОАФ}} = 10'3" = 333$ см). Это значение превышало высоты над ординарами Адмиралтейства и р. Мойки по сведениям Адмиралтейств-коллегии, Э.И. Шретера и В.Л. Крафта, соответственно равными 10'6" и 10'7" в английской футовой мере ($H_{\text{ОАФ}} = 10'6" = 320$ см, $H_{\text{ОРМ}} = 10'7" = 323$ см). С оценкой максимальной высоты наводнения 10 (21) сентября 1777 г. Ф.В. Бауера не были знакомы, вероятно, ни В.Л. Крафт, ни М.А. Рыкачев, ни Д.О. Святский, ни М.С. Грушевский и Н.Н. Лазаренко, ни Р.А. Нежиховский, ни К.С. Померанец. А.И. Мордухай-Болтовской рассматривал значение $H_{\text{ОАФ}} = 10'3"$ Ф.В. Бауера, как измеренное в английской футовой мере ($H_{\text{ОАФ}} = 10'3" = 312$ см) [18–29].

2) Ф.В. Бауер предложил безупречную систему обеспечения в будущем корректного сопоставления наблюдений и контроля за высотами наводнений и ординаром, включающим единственный опорный пункт наблюдений — Адмиралтейский футшток и постоянные метки максимальных, ординарных и промежуточных высот наводнений на камнях, вцементированных в стены каналов и зданий города, или отмеченных на специально построенных сооружениях и насеченных на них знаках, «которые ясно показывать будут высоту означенных вод» [1].

3) Ф.В. Бауер, как генерал-квартирмейстер, имел богатый опыт оперативного решения сложных комплексных проблем, в частности, путем их объединения. В этой связи допустимо предположение, что его оценка максимальной высоты наводнения 1777 г. могла предусматривать некий объем земляных

работ по подсыпке грунтов на подверженных наводнениям территориях города в соответствии с персональным указом Екатерины II. К сожалению, сведениями по этому вопросу мы на сегодняшний день не располагаем.

4) По материалам сохранившихся экземпляров перевода на русский язык нивелирного каталога и плана Ф.В. Бауера с уточненными адресами и номерами домов с нивелирными метками появляется реальная возможность определения и исследования топографии залитой части Санкт-Петербурга на эпоху наводнения Невы 10 (21) сентября 1777 г.

Литература

1. *Бауер Ф.В.* Нивелирование града Санкт-Петербурга сочиненное бывшим господином генерал инженером, генерал квартирмейстером, и разных российских орденов кавалером фон Бауром в 1779м году. Переведенное по Высочайшему повелению с иностранных языков на российский. в 1795м году Иваном Липгартом // ГМИ СПб. Фонд графики истории города. Шифр: I-A-549-K. 29 л.
2. *Бауер Ф.В.* Нивелирование Санкт-Петербурга, Военно-Топографическое Депо. № 11747. РГВИА (М). Ф. 846. Оп. 16. Д. 22434.
3. *Бауер Ф.В.* План Столичного Города Святого Петра с показанием возвышения воды от бывшего в 1777м году сентября 10го дня наводнения на плане под номерами синею краскою означенными. СПб.: ГМИ СПб. Фонд графики истории города. Шифр: I-A-548-K.
4. *Бауер Ф.В.* План Города Святого Петра со описанием знатного публичного строения и с показанием бывшего в 777м году сентября 10го дня наводнения, которое означается красною пунктированной линиею с синею оттушовкою. М.: РГВИА. Ф. 846. Оп. 16. Д. 22433.
5. *Крафт В.Л.* Известия и примечания г. Академика Крафта о разлициях Невы в Санктпетербурге, с присовокуплением таблицы прибывания и убывания воды в Кронштадтском канале каждого дня 1777 году // Новые ежемесячные сочинения. 1795. Ч. СІХ. С. 37–50; Ч. СХІ. С. 74–93.
6. *Tooke W.* View of the Russian Empire during the Reign of Catharine the Second, and to the Close of the Present Century». In three volumes. London, 1799. Vol. I. XLIV, 564 p., 1 map.
7. *Георги И.Г.* Описание Российско-Императорскаго столичнаго города Санкт-Петербурга и достопамятностей в окрестностях онаго / Перевод с нем. П. Безака. СПб., 1794. ХІС, [14], 727 с., план.
8. *Берх В.Н.* Подробное историческое известие о всех наводнениях, бывших в Санкт-Петербурге // Записки Государственного Адмиралтейского Департамента, относящиеся к мореплаванію, наукам и словесности. 1826. Ч. ХІ. С. 415–500.
9. *Аллер С.И.* Описание наводнения, бывшего в Санктпетербурге 7 числа Ноября 1824 года. СПб., 1826. VI с., 239 с., 2 приложения.
10. *Пушкарев И.* Описание Санктпетербурга и уездных городов С. Петербургской губернии. СПб.: Издано собственным иждивением автора, 1839. Ч. I. С. 32–33.
11. *Летопись* Петропавловской крепости 1703–1879 / Архив Музея истории Санкт-Петербурга. СПб., Петропавловская крепость. (Шифр: Кп-7249/III А-549 р.), 255 с.
12. *Рыкачев М.А.* О наводнениях в С. Петербурге и о возможности их предсказывать на основании метеорологических наблюдений // Записки по гидрографии. Вып. ХІХ. 1898. С. 99–124.
13. *Мультановский Б.* Наводнения в Ленинграде // Новый мир. 1925. № 1. С. 176–183.
14. *Малова Т.И.* Анализ материалов нивелирных и картографических работ, выполненных Ф.В. Бауром в связи с наводнением Невы 1777 г. // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. № 219. Вып. 2. История науки. СПб., 2009. С. 99–109.
15. *Богданов В.И., Малова Т.И.* Геодезические и картографические работы Ф.В. Бауера в связи с катастрофическим наводнением Невы в 1777 г. // Немцы в Санкт-Петербурге: Биографический аспект. XVIII–XIX вв. Вып. 5 / Отв. ред. Т.А. Шрадер. СПб.: Музей антропологии и этнографии им. Петра Великого (Кунсткамера) РАН, 2009. С. 12–29.
16. *Изображение жизни* покойнаго Генерала Инженера и Кавалера Федора Вилимовича Боура, Переведено с немецкаго Дмитрием Флееровым, на иждивении и под смотрением Н. М.А. Во граде С. Петра 1785 года.
17. *Глиноецкий Н.П.* История Русскаго Генеральнаго Штаба. Т. I. 1698–1824 гг. СПб.: Типография штаба войск гвардии и Петербургскаго военнаго округа, 1883. С. 66–75, 387.
18. *Krafft W.L.* Notices et remarques sur les débordemens de la Néva à St. Petersbourg, accompagnées d'une carte représentant la crue et la diminution des eaux du canal de Kronstadt, pour chaque jour de l'année 1777 // Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae, pro Anno 1777. St. Petersburg, 1780. P. 39–62.

19. Georgi J.G. Versuch einer Beschreibung der Russisch Kaiserlichen Residenzstadt St. Petersburg und der Mercmüroligkeiten der Gegend. Von Johann Gottlieb Georgi. Mit einem Plan und einer Karte. St. Petersburg, 1790. XVI, [6], 340, [10] s.
20. Каратыгин П.П. Летопись Петербургских наводнений 1703—1879 гг. СПб., 1889. 87 с.
21. Мордохай-Болтовской А.И. Уровни некоторых Ленинградских наводнений XVIII и начала XIX века // Известия Государственного Гидрологического института. 1932. № 48. С. 14—35.
22. Святский Д.О. Наводнения в устье реки Невы с 1300 по 1932 года // Сборник работ «Защита Ленинграда от нагонных наводнений». [Л.]: Леноблисполком Ленсовета, 1933. С. 268—291.
23. Грушевский М.С., Лазаренко Н.Н. Изучение Ленинградских наводнений и их предсказание // Труды ГОИН. Вып. 41. Л.: Гидрометеиздат, 1957. С. 142—158.
24. Нежиховский Р.А. Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
25. Померанец К.С. Наводнения в Петербурге 1703—1997. СПб.: «Компания Балтрус», «Балтрус-бук», 1998. [1], 171 с.
26. Померанец К.С. Наводнения / Статья в Энциклопедии «Три века Санкт-Петербурга». Т. I. «Осьмнадцатое столетие». Кн. 2. СПб.: СПбГУ, 2001. С. 7—9.
27. Померанец К.С. Дополнение и уточнение сведений о наводнениях в Санкт-Петербурге // Сборник работ по гидрологии. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. Вып. 27. С. 97—110.
28. Померанец К.С. Три века петербургских наводнений. СПб.: «Искусство — СПб», 2005. 216 с.
29. Померанец К.С. Несчастья невских берегов. Из истории невских наводнений. М.: Центрполиграф, 2009. 432 с.

References

1. Bauer F.W. Leveling of the city of St. Petersburg, composed by the former Mr. General Engineer, General Quartermaster, and various Russian orders, Chevalier von Baur in 1779. Translated by the Highest Command from foreign languages into Russian. in 1795 by Ivan Lipgart // GMI SPb. Fond grafiki istorii goroda. Shifr: I-A-549-K. 29 l.
2. Bauer F.W. Leveling St. Petersburg, Military Topographic Depot. № 11747. RGVIA (M). F. 846. Op. 16. D. 22434.
3. Bauer F.W. Plan of the Metropolitan City of St. Peter showing the rise of water from the 10th day of the flood in September 1777 on the plan under the numbers marked with blue paint. SPb.: GMI SPb. Fond grafiki istorii goroda. Shifr: I-A-548-K.
4. Bauer F.W. Plan of the City of St. Peter with a description of a noble public building and with an indication of the 10th day of the flood in September 777, which is indicated by a red dotted line with a blue shading. M.: RGVIA. F. 846. Op. 16. D. 22433.
5. Krafft W.L. News and notes of academician Krafft about floods of Neva in Saint-Petersburg, with the table of everyday water increasing and decreasing in Kronstadt channel in 1777. *Novyye Yezednevnyye Sochineniya*. 1795, Part CIX, 37—50; Part CXI, 74—93.
6. Tooke W. View of the Russian Empire during the Reign of Catharine the Second, and to the Close of the Present Century». In three volumes. London, 1799, Vol I, XLIV, 564 p., 1 map.
7. [Georgi I.G.] Description of the Russian-Imperial capital city of St. Petersburg and attractions in its vicinity. SPb., 1794, XIC, [14], 727 p., plan.
8. Berh V.N. Detailed historical information about all the floods in St. Petersburg // Zapiski Gosudarstvennogo Admiralteiskogo Departamenta, otnosyashiesya k moreplavaniyu, naukam i slovesnosti. 1826. Part XI, 415—500.
9. Aller S.I. Description of the flood that was in St. Petersburg on November 7, 1824. SPb., 1826. VI p., 239 p., 2 additions.
10. Pushkarev I. Description of St. Petersburg and county towns of St. Petersburg province. SPb., *Izdano sobstvennym izhdivenijem avtora*, 1839, I, 32—33.
11. Chronicle of the Peter and Paul Fortress 1703—1879 / Arhiv Muzeya istorii Sankt-Peterburga. SPb., Petropavlovskaya krepost'. (Shifr: Кп-7249/III A-549 p.), 255 p.
12. Rykachev M.A. Floods in St. Petersburg and the possibility of predicting them based on meteorological observations // Zapiski po gidrografii. Vyp. XIX. 1898. P. 99—124.
13. Multanovskiy B. Floods in Leningrad // Novyi mir. 1925. № 1. P. 176—183.
14. Malova T.I. Analysis of materials of leveling and cartographic works performed by F.V. Bauer in connection with the flood of the Neva in 1777. // Izvestiya Glavnoi astronomicheskoi observatorii v Pulkove. № 219. Vyp. 2. Istoriya nauki. SPb., 2009. P. 99—109.
15. Bogdanov V.I., Malova T.I. Geodetic and cartographic works of F.V. Bauer in connection with the catastrophic flood of the Neva in 1777. *Nemtsy v Sankt-Peterburge: Biograficheskii aspekt*. XVIII—XIX. Vyp. 5 / Otv. red. T.A. Shrader. SPb., *Muзей antropologii i etnografii im. Petra Velikogo (Kunstkamera) RAN*, 2009, 12—29.
16. Image of the life of the late General Engineer and Cavalier Fyodor Vilimovich Bour, Perevedeno s nemetskago Dmitriem Flerovym, na izhdivenii I pod smotreniyea N.M.A. Vo grade S. Petra 1785 goda.

17. *Glinetskiy N.P.* History of the Russian General Staff. V. I. 1698–1824. SPb., *Tipografiya shtaba voisk gvardii I Peterburgskago voennago okruga*, 1883, 66–75, 387.
18. *Krafft W.L.* Notices et remarques sur les débordemens de la Néva à St. Petersbourg, accompagnées d'une carte représentant la crue et la diminution des eaux du canal de Kronstadt, pour chaque jour de l'année 1777 // *Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*, pro Anno 1777. St. Petersburg, 1780. P. 39–62.
19. *Georgi J.G.* Versuch einer Beschreibung der Russisch Kaiserlichen Residenzstadt St. Petersburg und der Merkmüligkeiten der Gegend. Von Johann Gottlieb Georgi. Mit einem Plan und einer Karte. St. Petersburg, 1790. XVI, [6], 340, [10] s.
20. *Karatygin P.P.* Chronicle of the Petersburg floods, 1703–1879. SPb., 1889. 87 p.
21. *Mordukhai-Boltovskoy A.I.* Levels of some Leningrad floods of the 18th and early 19th centuries // *Izvestiya Gosudarstvennogo Gidrologicheskogo instituta*. 1932. № 48. P. 14–35.
22. *Svyatskiy D.O.* Floods at the mouth of the Neva River from 1300 to 1932 // *Sbornik rabot «Zaschita Leningrada ot nagonnyh navodneniy»*. [L.]: Lenoblspolkom Lensoveta, 1933. P. 268–291.
23. *Grushevskiy M.S.*, Lazarenko N.N. The study of the Leningrad floods and their prediction // *Trudy GOIN*. Vyp. 41. L.: *Gidrometeoizdat*, 1957. P. 142–158.
24. *Nezhihovsky R.A.* Hydrological issues of the Neva River and Neva Bay. L., 1988. 224 p.
25. *Pomeranetz K.S.* Floods in Petersburg, 1703–1997. SPb., 1998. [1], 171 p.
26. *Pomeranetz K.S.* Floods / Article in Encyclopedia «Three centuries of Saint-Petersburg». T.I. Kniga 2. SPb., 2001. P. 7–9.
27. *Pomeranetz K.S.* Addition and clarification of information about floods in St. Petersburg. SPb., 2004. Vyp. 27. S. 97–110.
28. *Pomeranetz K.S.* Three centuries of Neva floods. SPb., 2005. 216 p.
29. *Pomeranetz K.S.* Misfortunes of the Neva banks. From the history of the Neva floods. M., 2009. 432 p.

Об авторах

МАЛОВА Татьяна Игоревна, кандидат географических наук, РИНЦ AuthorID: 155138,
Scopus AuthorID: 6507606822, e-mail: malova.ti@yandex.ru

РОДИОНОВ Анатолий Александрович, член-корреспондент РАН, РИНЦ AuthorID: 13746,
ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466–2021,
e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru

© А. И. Машошин, 2022

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 197046, Россия, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30
*aimashoshin@mail.ru

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ Г.С. МАЛЫШКИНА И В.С. МЕЛЬКАНОВИЧА «КЛАССИЧЕСКИЕ И БЫСТРЫЕ ПРОЕКЦИОННЫЕ АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ В ГИДРОАКУСТИКЕ»¹

В издательстве АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» вышла из печати монография двух ведущих отечественных специалистов в области адаптивных алгоритмов пространственной обработки сигналов, поступающих с выхода многоэлементных гидроакустических антенн, Геннадия Степановича Малышкина и Виктора Сергеевича Мелькановича.

Данная монография является продолжением двухтомной монографии Г.С. Малышкина «Оптимальные и адаптивные методы обработки акустических сигналов», вышедшей в том же издательстве в 2009 и 2011 гг. В первом томе автором подробно описаны физические и математические модели гидроакустических сигналов и помех и показано, как на их основе могут быть синтезированы оптимальные алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. Поскольку оптимальные алгоритмы являются, строго говоря, не реализуемыми, во втором томе приведён синтез большинства известных адаптивных алгоритмов (Андерсена, Джонсона, Кейпона, Шмидта, Борджотти — Лагунаса и др.), появившихся во второй половине прошлого столетия, которые автором названы классическими.

Практическая реализация классических алгоритмов применительно к многоэлементным антеннам выявила ряд их существенных недостатков:

- классические алгоритмы базируются на гипотезе полной когерентности сигналов, не учитывая наличие рассеянной компоненты, ввиду чего их реальная помехоустойчивость при обнаружении слабых сигналов значительно уступает теоретической;
- время накопления корреляционных матриц входных сигналов, являющихся основой реализации адаптивных алгоритмов, как правило, существенно превышает интервалы пространственно-временной стационарности сигналов и помех, что приводит к расширению пространственного спектра помех и, как следствие, к снижению помехоустойчивости обнаружения слабых сигналов, представляющих наибольший интерес;
- реализация классических алгоритмов базируется на обращении корреляционных матриц большой размерности, что выдвигает высокие требования к производительности и объёму оперативной памяти вычислителя.

Устранение перечисленных недостатков явилось главной мотивацией разработки авторами новых адаптивных алгоритмов. Представляемая монография подводит промежуточный итог этой работы.

Авторы сосредоточились на задаче обнаружения слабых сосредоточенных источников акустических сигналов на фоне интенсивных локальных и распределённых помех в условиях многолучевого (многомодового) распространения сигналов и помех с рассеянием. При этом энергия рассеянных сигналов интенсивных источников может значительно превышать энергию слабых источников.

Идеи авторов монографии базируются на работах зарубежных авторов Р. Лаваля и И. Лабаска, посвящённых влиянию неоднородностей и нестационарности среды на пространственно-временную обработку сигналов, и российского специалиста М.В. Ратынского, высказавшего ряд оригинальных гипотез и получившего важные результаты при разработке адаптивных алгоритмов применительно к радиолокации.

В основу разработки новых адаптивных алгоритмов (которые авторами названы быстрыми проекционными) положена гипотеза (которая впоследствии нашла экспериментальное подтверждение) о возможности повышения помехоустойчивости адаптивных алгоритмов за счёт использования пространственно-

¹ СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. — 268 с., ISBN 978-5-91995-086-8

Ссылка для цитирования: Машошин А.И. Рецензия на монографию Г.С. Малышкина и В.С. Мелькановича «Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 140–141. doi:10.48612/fpg/12ba-kakg-gxd4

For citation: Mashoshin A.I. Review of the monograph by G.S. Malyshkin and V.S. Melkanovich “Classical and fast projection adaptive algorithms in hydroacoustics”. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, С. 140–141. doi:10.48612/fpg/12ba-kakg-gxd4

частотной когерентности искажений акустического поля, порожденных рассеянием сильных сигналов. При этом было показано, что интервалы временной когерентности рассеянных сигналов невелики (доли и единицы секунд), откуда следовало, что адаптивные алгоритмы должны базироваться на выборках предельно малого размера. Это, в свою очередь, позволяет распространить область применения адаптивных процедур на подавление импульсных помех применительно как к пассивным, так и к активным режимам работы гидроакустической аппаратуры.

Важной особенностью алгоритмов, разработанных авторами, является включение в них процедуры контролируемого ослабления (ограничения мощности) сильных сигналов, сформированных на коротком временном интервале, на котором случайные флуктуации коррелированы.

Монография состоит из 4-х глав и включает 3 приложения. Список литературы насчитывает 73 источника.

В 1-й главе приводится общая характеристика оптимальных и адаптивных методов обнаружения и пространственной фильтрации сигналов. Рассматриваются особенности построения алгоритмов обнаружения слабых сигналов при наличии помех с рассеянной компонентой.

Во 2-й главе содержится сопоставление классических и быстрых проекционных алгоритмов по выходу элементов антенны и по выходу сформированных пространственных каналов. Показано, что второй вариант позволяет существенно упростить реализацию алгоритмов. Раскрываются перспективы использования быстрых проекционных алгоритмов в режимах гидролокации, связи, обнаружения импульсных гидролокационных сигналов, а также для классификации обнаруженных целей.

В 3-й главе рассматриваются физические (многолучёвость и рассеяние) и технические (параметры спектрального анализа) факторы, влияющие на эффективность адаптивных алгоритмов. Применительно к многоцелевым ситуациям с интенсивным рассеянием анализируется вариант ослабления сильных мешающих сигналов с помощью процедуры «широкого нуля», реализуемой путём увеличения количества корректируемых собственных чисел.

Глава 4 посвящена модельным и натурным исследованиям эффективности классических и быстрых проекционных адаптивных алгоритмов в типовых помеховых ситуациях. Сделан вывод, что быстрые проекционные алгоритмы позволяют избавиться от недостатков, присущих классическим адаптивным алгоритмам.

Приложения содержат весьма полезные справочные данные, в частности по теории матриц и по вычислению пеленга источника сигнала при анализе пеленгационного рельефа.

Книга ориентирована на научных работников и инженеров, занимающихся проектированием гидроакустических средств, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

XXVIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ «ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ» В Г. ТОМСКЕ



В соответствии с Планом совещаний, конференций и симпозиумов, утвержденным Президиумом Сибирского отделения РАН на 2022 год 4–8 июля 2022 года был проведен очередной XXVIII Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Работа Симпозиума проходила в г. Томске (ИОА СО РАН).

Организаторами Симпозиума выступили: Институт оптики атмосферы СО РАН (г. Томск), Институт солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск), Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН и Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Основные задачи Симпозиума: обсуждение новейших результатов исследований, обмен научной информацией, планирование и организация научно-технических контактов между коллективами, оценка перспективных направлений и программ.

В работе Симпозиума участвовали 300 представителей 80-ти научных организаций со всей России, а также представители Ближнего Зарубежья. На Симпозиуме представлено 353 доклада, из них 4 пленарных, 89 устных, 260 стендовых.

Программа XXVIII Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» включала работу пяти конференций по фундаментальным проблемам: Молекулярная спектроскопия и распространение излучения в атмосфере и океане; Исследование атмосферы оптическими методами; Исследование океана оптическими методами; Физика тропосферы; Физика средней и верхней атмосферы. Были проведены специальная секция для молодых ученых и конкурс на лучший устный доклад. Тезисы докладов опубликованы к началу Симпозиума (<https://symp.iao.ru/ru/aoo/28/proceedings>); планируется издание специального выпуска журнала "Atmosphere", сборник докладов на английском языке в "Proceedings of SPIE" (декабрь, 2022).

Возросло количество докладов, посвященных исследованию океана. В 2022 г. они выделены в отдельную конференцию — конференция С (Исследование океана оптическими методами). Было представлено 43 доклада. Особый интерес вызвал пленарный доклад Владимира Петровича Шевченко (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия) «Рассеянное осадочное вещество в приводном слое атмосферы и водной толще морей Евразийской Арктики».

Предложено провести очередной XXIX Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» в 2023 году на базе Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва).

*Суторихин И.А., д.ф.-м.н., член оргкомитета Симпозиума,
Харченко О.В., к.ф.-м.н., ученый секретарь Симпозиума*

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 2022 (Т. 15)

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГИДРОФИЗИКИ		Выпуск	Страницы
1.	<i>Гневашев В.Г., Белоненко Т.В.</i> Аналитическое решение лучевых уравнений Гамильтона для волн Россби на стационарных сдвиговых потоках	2	8–18
2.	<i>Зуев В.А., Грамузов Е.М., Куркин А.А., Двойченко Ю.А., Себин А.С.</i> Физическое моделирование деформации ледяного покрова нагрузкой, движущейся с малой скоростью	2	19–32
3.	<i>Вострякова, И.А. Капустин, Т.Н. Лазарева, О.А. Даниличева, С.А. Ермаков</i> Лабораторное исследование компрессии поверхностно-активной пленки и трансформации ее границы под действием поверхностной волны	4	63–73
ДИНАМИКА ОКЕАНА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ			
4.	<i>Левина Г.В.</i> Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов	2	47–59
ВЕТРОВЫЕ, ДЛИННЫЕ НЕПРИЛИВНЫЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ			
5.	<i>Чаликов Д.В.</i> Различные подходы к моделированию морских волн	1	19–32
6.	<i>Карпов И.О., Переслегин С.В.</i> Модель радиолокационного наблюдения вибрационных поверхностных волн, возбуждаемых источником землетрясений (донным вибратором)	1	48–60
7.	<i>Кориненко А.Е., Малиновский В.В., Дулов В.А., Кудрявцев В.Н.</i> Оценка времени жизни «барашка» обрушивающейся волны	1	61–72
8.	<i>Фокина К.В., Булгаков К.Ю.</i> Совместное моделирование ветровых волн и волнового пограничного слоя	1	73–81
9.	<i>Новотрясов В.В., Дубина В.А., Митник Л.М.</i> Восстановление параметров внутренних приливных боров в море Банда по данным спутникового дистанционного зондирования	4	8–22
РЕГИОНАЛЬНАЯ ГИДРОФИЗИКА			
10.	<i>Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В.</i> Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами	1	82–97
11.	<i>Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А.</i> О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое состояние	1	98–111
12.	<i>Якшина Д.Ф., Голубева Е.Н.</i> Исследование климатических изменений в Чукотском море и море Бофорта на основе численного моделирования	2	60–75
13.	<i>Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Хмара Т.В.</i> Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы.	2	110–123
14.	<i>Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М.</i> Восстановление полей солёности Азовского моря с использованием регрессионных связей между данными <i>in situ</i> и региональными спутниковыми продуктами	3	114–124
15.	<i>Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А.</i> Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной хоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века	4	23–41
ДИНАМИКА И ГИДРОДИНАМИКА МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ			
16.	<i>Плыгунова К.С., Козелков А.С., Стрелец Д.Ю., Уткин Д.А., Курулин В.В.</i> Исследование влияния численного метода и сеточных параметров на точность моделирования свободных колебаний цилиндра на водной поверхности	2	33–46
ГИДРОАКУСТИКА			
17.	<i>Консон А.Д., Волкова А.А.</i> Модуляция шумового сигнала при качке корабля вследствие флуктуирующей интерференции лучей	4	74–81

ГИДРООПТИКА			
18.	<i>Мольков А.А.</i> Качественные оценки возможности восстановления профиля волнения по модельным стереоизображениям круга Снеллиуса	1	33–47
19.	<i>Шибанов Е.Б., Ли М.Е.</i> Влияние полидисперсности гидрозоля на спектральные свойства рассеяния света морской водой в малых углах	3	18–26
20.	<i>Корчемкина Е.Н., Маньковская Е.В.</i> Связь биооптических параметров вод Черного моря с характеристиками коэффициента яркости весной 2019 года	3	53–64
21.	<i>Лохов А.С., Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А.</i> Исследование взвешенных веществ оптическим методом в желобе Франц-Виктория в Баренцевом море	3	65–72
22.	<i>Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю.</i> Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море	3	73–83
23.	<i>Вазюля С.В., Шеберстов С.В.</i> Алгоритмы оценки биооптических характеристик в Финском заливе с использованием эмпирических ортогональных функций	3	84–96
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ			
24.	<i>Исаев А.В., Савчук О.П., Филатов Н.Н.</i> Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть I: Межгодовая изменчивость и пространственное распределение	2	76–97
25.	<i>Савчук О.П., Исаев А.В., Филатов Н.Н.</i> Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть II: Сезонная динамика и пространственные особенности; интегральные потоки	2	98–109
26.	<i>Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В.</i> Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря по данным контактных измерений	2	124–137
27.	<i>Рахуба А.В., Шмакова М.В.</i> Нестационарный режим водохранилища: опыт моделирования русловых процессов с подвижным дном	2	138–149
28.	<i>Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Салюк П.А., Пономарев В.И., Артемьев В.А., Глуховец Д.И., Латушкин А.А.</i> Распределение содержания хлорофилла-а в Атлантическом океане в декабре 2019 г — январе 2020 г. по данным судовых измерений при различных гидрометеорологических условиях	3	97–113
29.	<i>Ковалёва И.В., Финенко З.З., Суслин В.В.</i> Тренды изменения первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования в глубоководной области Черного моря в 1998–2015 годы	4	42–53
30.	<i>Аглова Е.А., Глуховец Д.И.</i> Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла <i>a</i> в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей	4	54–62
31.	<i>Степаненко В.М., Ломов В.А., Гречушникова М.Г.</i> Численное моделирование временной изменчивости эмиссии метана из Можайского водохранилища	4	82–100
32.	<i>Аншаков А.С.</i> (на англ. яз.) Моделирование гидродинамических и литодинамических береговых процессов в районе морского порта	4	101–108
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ			
33.	<i>Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А.</i> Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий	3	27–42
34.	<i>Ли М.Е., Мартынов О.В.</i> Быстродействующий метод измерения спектров яркости восходящего излучения моря	3	43–52
35.	<i>Лучинин А.Г., Кириллин М.Ю.</i> Характеристики системы видения на волнах фотонной плотности при наблюдении подводных объектов через взволнованную поверхность	3	125–136

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

36.	<i>Родионов А.А., Румянцев В.А., Фёдоров М.П., Зиновьев А.Т., Кривошей В.А., Медведева О.Е., Троицкая Ю.И., Дёмин С.П., Малова Т.И., Чусов А.Н., Шишкина О.Д., Моисеев А.В., Каменский С.Б., Краев И.М., Марусин К.В.</i> Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от городского гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе	4	109–131
-----	---	---	---------

ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ ГИДРОФИЗИКИ

37.	<i>Малова Т.И.</i> «Наводнения Невы XVIII в.». Электронная база данных	1	112–118
38.	<i>Феклова Т.Ю.</i> Пекин — Порт-Артур — Владивосток: организация магнитно-метеорологических обсерваторий Академии наук на Дальнем Востоке в XIX — начале XX веков	2	150–162
39.	<i>Малова Т.И., Родионов А.А.</i> Катастрофическое наводнение Невы 10 (21) сентября 1777 г. Так в каких же футах оно было измерено...	4	132–139

ХРОНИКА

40.	<i>Эзау И.Н.</i> XXI-й век: Смена парадигмы в теории планетарного пограничного слоя	1	9–18
41.	<i>Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А.</i> Обзор работ Олега Викторовича Копелевича по оптике океана	3	9–17
42.	Памяти Иосифа Марковича Левина	3	137–138
43.	XXVIII Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» в г. Томске	4	142

РАЗНОЕ

44.	О книге С.В. Грибина «Формальная физика: уравнения движения»	1	119–122
45.	<i>Машошин А.И.</i> Рецензия на монографию Г.С. Малышкина и В.С. Мелькановича «Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике»	4	140–141

Авторский указатель 2022 (Т. 15)

- Аглова Е.А. — № 4
Аншаков А.С. — № 4
Артамонов Ю.В. — № 2
Артемьев В.А. — № 3
Атаджанова А.А. — № 4
Белоненко Т.В. — № 2
Булгаков К.Ю. — № 1
Вазюля С.В. — № 3
Волкова А.А. — № 4
Вострякова — № 4
Глухов В.А. — № 3
Глуховец Д.И. — № 3(2),4
Гневых В.Г. — № 2
Голубева Е.Н. — № 2
Гольдин Ю.А. — № 3(2)
Гречушников М.Г. — № 4
Даниличева О.А. — № 4
Дёмин С.П. — № 4
Дубина В.А. — № 4
Дулов В.А. — № 1
Ермаков С.А. — № 4
Ефимова Т.В. — № 3
Жегулин Г.В. — № 3
Захарков С.П. — № 3
Зимин А.В. — № 4
Зиновьев — № 4
Иванов В.В. — № 1
Исаев А.В. — № 2(2)
Каменский — № 4
Капустин И.А. — № 4
Карпов И.О. — № 1
Кивва К.К. — № 1
Кириллин М.Ю. — № 3
Кловиткин А.А. — № 3
Ковалёва И.В. — № 4
Козелков А.С. — № 2
Коник А.А. — № 4
Консон А.Д. — № 4
Кориненко А.Е. — № 1
Корчемкина Е.Н. — № 3
Костяная Е.А. — № 1
Костяной А.Г. — № 1
Кравчишина М.Д. — № 3
Краев И.М. — № 4
Кривошей В.А. — № 4
Кудрявцев В.Н. — № 1
Курулин В.В. — № 2
Лазарева Т.Н. — № 4
Латушкин А.А. — № 2,3
Лебедев С.А. — № 1
Левина Г.В. — № 2
Ли М.Е. — № 3(2)
Ли М.Е. — № 3
Ломов В.А. — № 4
Лохов А.С. — № 3
Лучинин А.Г. — № 3
Малиновский В.В. — № 1
Малова Т.И. — № 1,4(2)
Маньковская Е.В. — № 3
Мартынов О.В. — № 3
Марусин К.В. — № 4
Машошин А.И. — № 4
Медведева О.Е. — № 4
Мезенцева И.В. — № 2
Митник Л.М. — № 4
Моисеев А.В. — № 4
Моисеева Н.А. — № 3
Мольков А.А. — № 1
Новотрясов В.В. — № 4
Переслегин С.В. — № 1
Плыгунова К.С. — № 2
Пономарев В.И. — № 3
Рахуба А.В. — № 2
Родионов А.А. — № 4(2)
Родионов М.А. — № 3
Румянцев В.А. — № 4
Савчук О.П. — № 2(2)
Салюк П.А. — № 3
Серых И.В. — № 1
Скороход Е.Ю. — № 3
Скрипалева Е.А. — № 2
Смирнов А.В. — № 1
Совга Е.Е. — № 2
Степаненко В.М. — № 4
Стрелец Д.Ю. — № 2
Сумкина А.А. — № 1
Суслин В.В. — № 3,4
Троицкая Ю.И. — № 4
Уткин Д.А. — № 2
Федирко А.В. — № 2
Фёдоров М.П. — № 4
Феклова Т.Ю. — № 2
Филатов Н.Н. — № 2(2)
Финенко З.З. — № 4
Фокина К.В. — № 1
Хмара Т.В. — № 2
Чаликов Д.В. — № 1
Чурилова Т.Я. — № 3
Чусов А.Н. — № 4
Шеберстов С.В. — № 3
Шибанов Е.Б. — № 3
Шишкина О.Д. — № 4
Шмакова М.В. — № 2
Штрайхерт Е.А. — № 3
Шукало Д.М. — № 3
Шульга Т.Я. — № 3
Эзау И.Н. — № 1
Якшина Д.Ф. — № 2