

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 61

Научно-теоретический журнал

*Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год*

ISSN 2074-2762

Санкт-Петербург
РГГМУ
2020

УДК 3 + 502.52 + 55
ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Гидрометеорология и экология. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 61. Научно-теоретический журнал. СПб.: РГТМУ, 2020. 156 с.

Представлены статьи по наиболее актуальным современным проблемам изучения природной среды: изменениям климата в региональном и глобальном масштабах; мониторингу, моделированию и прогнозированию физических процессов в атмосфере, водах суши и морской среде; влиянию антропогенной деятельности на разнообразные процессы в биосфере, атмосфере и гидросфере Земли. Материал сгруппирован по специальностям. В разделе «Хроника» освещены события жизни университета.

Журнал предназначен для ученых, широкой категории исследователей природной среды, а также аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

Редакционный совет:

Чилингаров А.Н., д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН, президент РГТМУ — *председатель совета*
Михеев В.Л., канд. юрид. наук, доцент, ректор РГТМУ — *зам. председателя совета*
Агафонов Г.И., д-р техн. наук, академик РАН, председатель совета директоров холдинговой компании «Пигмент»; **Анри де Люмле**, PhD, проф., член-корр. Французской академии наук (Франция); **Камболлов М.А.**, канд. юрид. наук, вице-президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; **Квинт В.Л.**, д-р экон. наук, проф., главный научный сотр. Центрального экономико-математического института РАН; **Кулешов Ю.В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского по учебной и научной работе; **Лил В.У.**, PhD, проф. Гамбургского ун-та (Германия) и Манчестерского ун-та (Великобритания); **Малори Жан**, PhD, профессор, почетный президент РГТМУ (Франция); **Орыщенко А.С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Сальников В.Г.**, д-р геогр. наук, проф., декан ф-та географии и природопользования Казахского национального университета им. Аль-Фараби; **Сильников М.В.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, директор Института военно-технического обучения и безопасности СПбПУ; **Тимофеева А.Г.**, канд. геогр. наук, ректор Института повышения квалификации Росгидромета; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Хуакин Л.**, PhD, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Дрейжер (КНР).

Редакционная коллегия:

Малинин В.Н., д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*
Погорельцев А.И., д-р физ.-мат. наук, проф. — *зам. главного редактора*
Кондратьев С.А., д-р физ.-мат. наук — *зам. главного редактора*
Гайдукова Е.В., канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*
Белоненко Т.В., д-р геогр. наук, проф.; **Вильфанд Р.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В.В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Кудрявцев В.Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Лобанов В.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мохов И.И.**, д-р физ.-мат. наук, академик РАН; **Мушкет И.И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Перцев Н.Н.**, д-р физ.-мат. наук; **Прошутинский А.Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Румянцев В.А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябченко В.А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Татарникова Т.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Тимофеев Ю.М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Угрюмов А.И.**, д-р геогр. наук, проф.; **Федорова Н.Ю.**, канд. пед. наук, доцент; **Филатов Н.Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Фролов И.Е.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Хоссфельд Уве**, PhD, университет Йена (Германия); **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г.Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 07.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

ISSN 2074-2762

Подписной индекс 78576 в «Каталоге российской прессы "Почта России"».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Полнотекстовые версии опубликованных статей в виде pdf-файлов размещаются в Интернете для свободного доступа на сайте журнала <http://www.fshu.ru/university/notes/archive/> сразу же после его выхода.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редколлегии: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГТМУ), 2020
© Авторы публикаций, 2020

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

THE FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
“RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY”

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN STATE
HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

№ 61

A theoretical research journal

*Published since October, 2005
4 issues a year*

ISSN 2074-2762

St. Petersburg
RSHU
2020

UDC 3 + 502.52 + 55

LBC 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Hydrometeorology and Ecology. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. No. 61. St. Petersburg: RSHU Publishers, 2020. 156 p.

The Journal contains articles on the most relevant contemporary problems of studying the environment: climate change in regional and global scales; monitoring, modeling and forecasting of physical processes in the atmosphere, inland and ocean waters; influence of anthropogenic activity on various processes in the biosphere, atmosphere and hydrosphere of the Earth. The material is grouped by specialty. The "Chronicle" section covers the events of the University life.

The Journal is intended for scientists, a broad category of environmental researchers, as well as post-graduate and graduate students of these specialties.

The Editorial Board:

Chilingarov A.N., Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of RSHU — *Chairman*

Mikheev V.L., PhD in Juridical Sciences, Associate Professor, Rector of RSHU — *Vice-Chairman*

Agafonov G.I., Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, Board Chairman of "Pigment" holding company; **Fedorov M.P.**, Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Henry de Lumley**, PhD, Professor, Corresponding Member of the Academy of Sciences, France; **Huaqing Lu**, PhD, Professor, Vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Kambolov M.A.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-president of the National Research Center «Kurchatov Institute»; **Kuleshov Iu.V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Vice-president of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research; **Kvint V.L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Leal W.**, PhD, Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (UK); **Malaurie Jean**, PhD, Professor, Honorary President of RSHU, France; **Otryshchenko A.S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Salnikov V.G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of Department of Geography and Natural Management Faculty of Al-Farabi Kazakh National University; **Silnikov M.V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Military-Technical Education and Security Institute of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Timo-feeva A.G.**, PhD in Geography, Rector of the Institute for Advanced Studies of Roshydromet

Editors:

Malinin V.N., Grand PhD in Geography, Professor — *Editor in Chief*

Pogoreltsev A.I., Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor — *Deputy Editor in Chief*

Kondratev S.A., Grand PhD in Physics and Mathematics — *Deputy Editor in Chief*

Gaidukova E.V., PhD in Engineering — *Executive editor*

Belonenko T.V., Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Fedorova N.Iu.**, PhD in Pedagogic Sciences, Associate Professor; **Filatov N.N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Frolov I.E.**, Grand PhD in Geography, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Hossfeld Uve**, PhD (University of Jena, Germany); **Kudriavtsev V.N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Lobanov V.A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mokhov I.I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Mushket I.I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Pertsev N.N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Proshutinskii A.Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Rumyantsev V.A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S.P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Tatarnikova T.M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Timofeev Iu.M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Ugryumov A.I.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shchukin G.G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R.M.**, Grand PhD in Engineering, Professor

The Journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, which should publish the main results of theses for the Doctor and Candidate of sciences degree.

The Journal is registered in the Russian Federal Surveillance Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection in the North-Western Federal District.

Certificate III № ФЦ2-8484 of July 02, 2007.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geocology, geophysics, social and human sciences.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

Subscription index 78576 in «Catalogue of the Russian press "Post of Russia"».

The Journal is included in the «Russian Science Citation Index» database (RSCI), based on the platform of the National Electronic Library (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Office address: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia.

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2020
© Authors of publications, 2020

ISSN 2074-2762

Содержание

Метеорология

- Т.Е. Симакина, С.В. Крюкова.* Пространственно-временное распределение концентрации приземного озона в Санкт-Петербурге 407
- Е.Н. Яковлева, Н.Н. Яшалова, В.С. Васильцов.* Анализ природно-климатических рисков видов экономической деятельности в Российской Федерации 421

Гидрология

- Е.В. Давыденко, Е.В. Гайдукова, М.С. Дрегваль.* Особенности уровня режима озер Кольского полуострова 437
- А.Э. Сумачев, Л.С. Банищикова.* Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода 446
- А.Н. Чернышев, В.О. Сергеева, А.К. Котова, С.Н. Никитина, А.В. Бабин, Е.Ю. Воякина, А.Б. Степанова.* Особенности лимнологических параметров системы «Лещевое озеро — Лещевый залив» в период максимального прогрева воды (Валаамский архипелаг, Ладожское озеро) 460

Океанология

- В.Г. Гневыхшев, Т.В. Белоненко.* Парадокс Россби и его решение 480
- А.В. Килесо, Ж.И. Стонт.* Некоторые аспекты изменчивости уровня Куршского залива (Юго-Восточная Балтика) при различных синоптических ситуациях 494

Экология

- Д.А. Лебедев, А.А. Никанорова.* Раздельное накопление и сбор отходов: перспективы и возможности 507
- О.И. Лобчук, А.В. Килесо.* Пространственное распределение и источники антропогенного морского мусора на побережье Калининградской области 521

Социально-гуманитарные науки

- Е.В. Несмеянов.* О теории миража, погубившего «Титаник» 534

Хроника

- Конгресс «Россия в Арктическом совете. Потенциал Санкт-Петербурга» и форум «Доступная Арктика» 547
- РГГМУ на Всероссийском форуме «Устойчивое развитие» 549
- Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» 551

Contents

Meteorology

- T.E. Simakina, S.V. Kryukova.* Spatio-temporal distribution of surface ozone in Saint Petersburg 407
- E.N. Yakovleva, N.N. Yashalova, V.S. Vasil'tsov.* Analysis of climate security of economic activities in the Russian Federation 421

Hydrology

- E.V. Davydenko, E.V. Gaidukova, M.S. Dregval.* Features of the level regime of the Kola peninsula lakes. 437
- A.E. Sumachev, L.S. Banshchikova.* Ice regime of the Pechora river and features of forecasting the highest ice drift level 446
- A.N. Chernyshev, V.O. Sergeeva, A.K. Kotova, S.N. Nikitina, A.V. Babin, E.Ju. Voyakina, A.B. Stepanova.* Limnological parameters features of “Lake Leschovoye — Leschovyi bay” system in maximum water heating period (Valaam archipelago, lake Ladoga) 460

Oceanology

- V.G. Gnevyshev, T.V. Belonenko.* The Rossby paradox and its solution. 480
- A.V. Kileso, Zh.I. Stont.* Some aspects of the water level variability of the Curonian Lagoon (South-Eastern Baltic) under various synoptic situations 494

Ecology

- D.A. Lebedev, A.A. Nikanorova.* Separate waste accumulation and collection: prospects and opportunities 508
- O. Lobchuk, A. Kileso.* Spatial distribution and sources of anthropogenic marine litter on the sea shore of the Kaliningrad region. 521

Social science and humanities

- E.V. Nesmeyanov.* On the mirage theory of the *Titanic* disaster. 534

- Chronicle** 547

УДК [551.510.522:546.214](470.23-25)

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-407-420

Пространственно-временное распределение концентрации приземного озона в Санкт-Петербурге

Т.Е. Симакина, С.В. Крюкова

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, tatiana.simakina@gmail.com

По данным 12 станций экологического мониторинга в Санкт-Петербурге построены ежемесячные поля изолиний концентрации тропосферного озона. Показано увеличение концентрации приземного озона от центра города к его периферии. Выражен годовой ход пространственного распределения концентрации озона на территории Санкт-Петербурга: площадь зоны с пониженным уровнем загрязнения наиболее велика в конце осени — начале весны и уменьшается к концу весны — началу лета. Установлено наличие областей с превышением существующего на сегодняшний день норматива предельно допустимой среднесуточной концентрации в течение всего года, причем в периоды традиционного повышения приземной концентрации озона весной и летом она превышает предельно допустимую на всей территории города.

Ключевые слова: мониторинг загрязнения атмосферы, тропосферный озон, пространственно-временная изменчивость озона, сезонные вариации, предельно допустимая концентрация, интерполяция.

Spatio-temporal distribution of surface ozone in Saint Petersburg

T.E. Simakina, S.V. Kryukova

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

The paper is devoted to the research of the surface ozone distribution annual dynamics in St. Petersburg. Based on data from 12 stations of the environmental monitoring network, the analysis of distributions and time course of surface ozone concentrations has been carried out. Almost all stations have two maximum ozone concentrations — spring and summer, a minimum being in December. Using the inverse distance method the interpolation fields of surface ozone concentrations have been plotted for each month of the year. The ozone content has been shown to decrease in the troposphere from the suburbs of St. Petersburg to the city center. The diameter of the area of ozone concentrations low values has a pronounced annual course: the largest being in late autumn-early spring, decreasing by the late spring — early summer.

The presence of areas, exceeding the Russian current standard for the maximum allowable daily average concentration of $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ throughout the year, has been established, the surface ozone concentration exceeding the maximum allowable one throughout the city during the periods of spring-summer rise. The population living in the ozone-contaminated area amounts to 190 thousand inhabitants in December and increases 26 times by April—June. This fact proves the need to take urgent measures to protect the population or to review the Russian Federation current standards.

The connection has been found between duration of the surface ozone level rise and its average concentration at stations of St. Petersburg approximated by a logarithmic dependence.

It has been shown that throughout the year in St. Petersburg there is a statistically significant negative relationship between concentrations of the secondary pollutant (tropospheric ozone) and the primary pollutant (nitrogen dioxide).

Keywords: monitoring of air pollution, tropospheric ozone, spatial-temporal ozone variability, seasonal variations, maximum permissible concentration, interpolation.

For citation: *T.E. Simakina, S.V. Kryukova.* Spatio-temporal distribution of surface ozone in Saint Petersburg. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 61: 407—420. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-407-420

Введение

Известно, что газ озон в зависимости от того, на какой высоте в атмосфере он находится, играет две прямо противоположные роли. Стратосферный озон защищает человека и биосферу от опасных уровней УФ-радиации. В то же время озон в тропосфере входит в пятерку основных загрязнителей атмосферы, ему присвоен первый класс опасности. В этой связи необходим тщательный инструментальный контроль содержания тропосферного, и особенно приземного, озона. Режим регулярного мониторинга концентрации озона предполагает регистрацию эпизодов превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) с локализацией мест превышения в пределах городской территории, оценку вероятности преодоления ПДК, выработку краткосрочных и долгосрочных планов по улучшению качества воздуха. Эти проблемы носят во многом локальный характер, поскольку протекание природных и антропогенных процессов, влияющих на приземную концентрацию озона (ПКО), зависит от местных условий.

Повышение концентрации тропосферного озона наблюдается во всех странах мира. Большинство случаев, когда в США отмечалось неудовлетворительное качество воздуха, связано с повышенным уровнем содержания озона [1]. Западная Европа помещает приземный озон на второе место в ряду наиболее опасных загрязнителей воздуха после мелких взвешенных веществ ($PM_{2,5}$). В России эпизоды, когда содержание озона превышало ПДК, впервые были зарегистрированы в Москве в конце 1990 г. [2]. Наиболее опасные случаи наблюдались в Москве и ее окрестностях в период жаркой погоды в 2002 и 2010 гг.: концентрация озона превышала все значения, когда-либо зарегистрированные в подавляющем большинстве стран Европы [3].

Во всех странах имеются государственные стандарты, регламентирующие предельно допустимые концентрации основных загрязнителей атмосферы. В России этот уровень для озона составляет: среднее за 20 мин $ПДК_{\text{мр}} = 0,16 \text{ мг/м}^3$; среднее за сутки $ПДК_{\text{св}} = 30 \text{ мкг/м}^3$ [4].

Увеличивается объем статистически достоверных данных о корреляции повышения содержания озона в тропосфере с ростом числа определенного вида заболеваний и смертности населения [2, 3, 5]. Установлено, что воздействие озона приводит к повреждению коронарных сосудов, атеросклерозу и инфаркту, увеличению размера атеросклеротических бляшек, а также усиливает

проявления ишемических заболеваний [2]. Снижение работоспособности при высокой нагрузке на открытом воздухе в течение восьми часов наблюдается при концентрации 120 мкг/м^3 , при 200 мкг/м^3 появляются кашель, хрипота, першение в горле.

В работе [3] упоминаются следующие данные. Увеличение концентрации озона на $\sim 20 \text{ мкг/м}^3$ приводит к увеличению смертности на $\sim 0,64 \%$ от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхания. Увеличение часовой концентрации озона на $\sim 10 \text{ мкг/м}^3$ приводит к увеличению смертности на $\sim 0,45 \%$. При средней дневной (среднее значение за восемь часов светлого времени) концентрации приземного озона, равной 70 мкг/м^3 , он уже оказывает негативное влияние на здоровье человека и приводит к увеличению смертности на $\sim 0,6 \%$. В работе [5] отмечается синергизм воздействия таких факторов, как высокая температура воздуха и повышенная концентрация озона, на здоровье населения.

В сложившейся ситуации важно иметь как можно более полную и достоверную информацию о содержании озона в атмосфере, что возможно за счет организации плотной сети мониторинга качества атмосферного воздуха.

В Санкт-Петербурге развивается и функционирует сеть станций экологического мониторинга, организованная Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. На станциях ведутся непрерывные (с шагом 20 мин) измерения концентрации загрязняющих веществ (ЗВ), входящих в пятерку основных соединений, содержание которых в приземном слое атмосферы по требованию Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) необходимо определять для оценки качества воздуха: кроме озона, это взвешенные вещества, монооксид углерода, диоксид азота и диоксид серы. Концентрация тропосферного озона (O_3) измеряется на двенадцати из 25 станций, составляющих сеть на сегодняшний день. В сводках, печатаемых Комитетом в сети Интернет (Экологический портал Санкт-Петербурга: <http://www.infoeco.ru>), ПКО указывается в долях среднесуточной предельно допустимой концентрации.

Настоящая работа посвящена исследованию годовой динамики распределения содержания приземного озона в воздухе Санкт-Петербурга на основе интерполяционных полей, построенных методом обратных расстояний [6]. Данные о концентрации O_3 за период 2018—2019 гг. получены в результате измерений на двенадцати станциях сети мониторинга (рис. 1).

Приземный озон в Санкт-Петербурге

Основным источником озона в приземном слое атмосферного воздуха является сложный цикл фотохимических реакций [3, 5, 7] с участием ультрафиолетового солнечного излучения и первичных загрязнителей. Последние в атмосферу города поставляют в основном автотранспорт. В двигателях внутреннего сгорания при высокой температуре в результате взаимодействия атомов азота и кислорода формируются оксиды азота. При сгорании топлива в атмосферу также попадают летучие органические компоненты, включающие углеводороды. Взаимодействуя

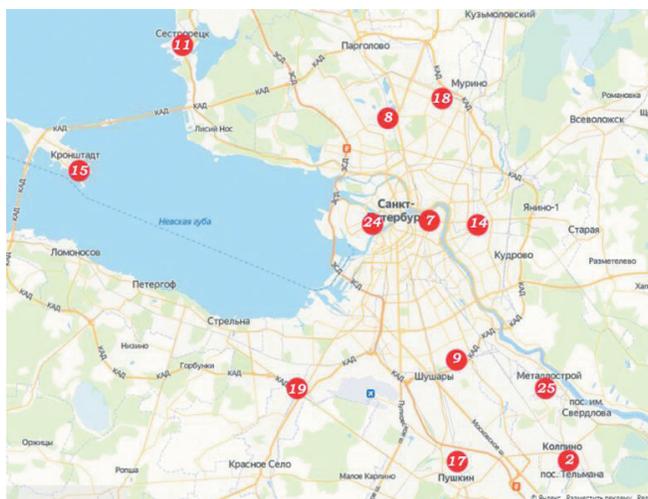


Рис. 1. Схема размещения станций измерения ПКО в Санкт-Петербурге.

Fig. 1. The layout of the stations measuring the SOC in St. Petersburg.

в атмосфере, оксиды азота и летучие органические компоненты формируют вторичный загрязнитель — озон.

Связь с диоксидом азота можно проследить по коэффициенту корреляции. Временной ход коэффициента корреляции между ПКО и концентрацией NO_2 в Санкт-Петербурге представлен на рис. 2. Расчет выполнен по выборке объемом 144 значения, коэффициенты корреляции значимы. В течение года наблюдается отрицательная связь между первичным и вторичным ЗВ, значения коэффициента колеблются от $-0,3$ до $-0,7$. Усиления связи происходят в начале весны и начале осени, минимумы наблюдаются в мае и декабре.

В работе выполнен анализ случаев превышения ПКО национальных стандартов ПДК_{сс}. Продолжительность периодов превышения ПКО предельных значений изменяется от станции к станции. Обнаружена зависимость таких периодов от средней ПКО на станции: чем больше средняя концентрация, тем более длительный период превышения τ . Пример распределения числа дней за месяц, когда концентрация O_3 превышала 1 ПДК_{сс}, и средней концентрации озона в долях среднесуточной предельно допустимой концентрации представлен на рис. 3. Погрешность вычисления τ составила 1,8 дня, средней ПКО — 0,09 ПДК_{сс}.

Для зимнего периода получена эмпирическая зависимость продолжительности периода τ от среднемесячного значения ПКО:

$$\tau = 21,8 \ln(\text{ПКО}) + 15,3,$$

где ПКО — концентрация O_3 в диапазоне превышения ПДК_{сс} в 0,5—2 раза.

Наблюдается значительная изменчивость ПКО по территории города. Существенные различия наблюдаются даже в зимний период, когда поле ПКО по городу довольно однородно. В качестве примера на рис. 4 представлена

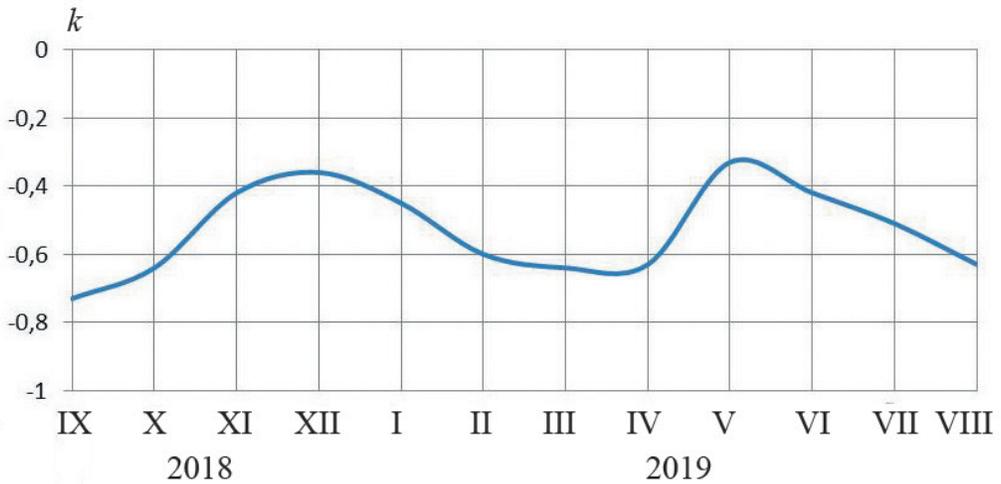


Рис. 2. Годовой ход коэффициента корреляции (k) между ПКО и NO_2 в Санкт-Петербурге.

Fig. 2. The annual course of the correlation coefficient between SOC and NO_2 in St. Petersburg.

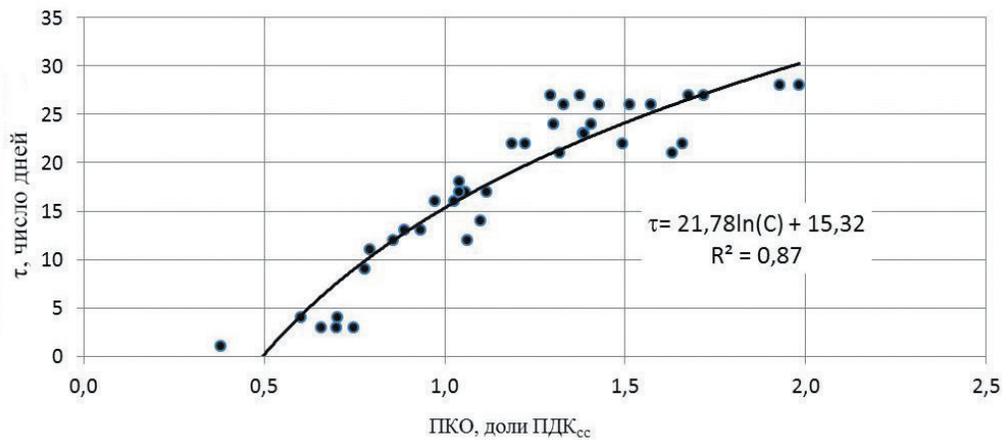


Рис. 3. Продолжительность периодов (число дней) повышенного уровня ПКО (больше $30 \text{ мкг/м}^3 = 1 \text{ ПДК}_{\text{сс}}$) в зависимости от среднего значения ПКО (в долях ПДК_{сс}) по данным 12 станций Санкт-Петербурга в зимний период.

Fig. 3. Duration of elevated SOC levels (more than $30 \text{ }\mu\text{g/m}^3 = 1 \text{ MAC}$) depending on the average SOC values according to data from 12 stations of St. Petersburg in the winter.

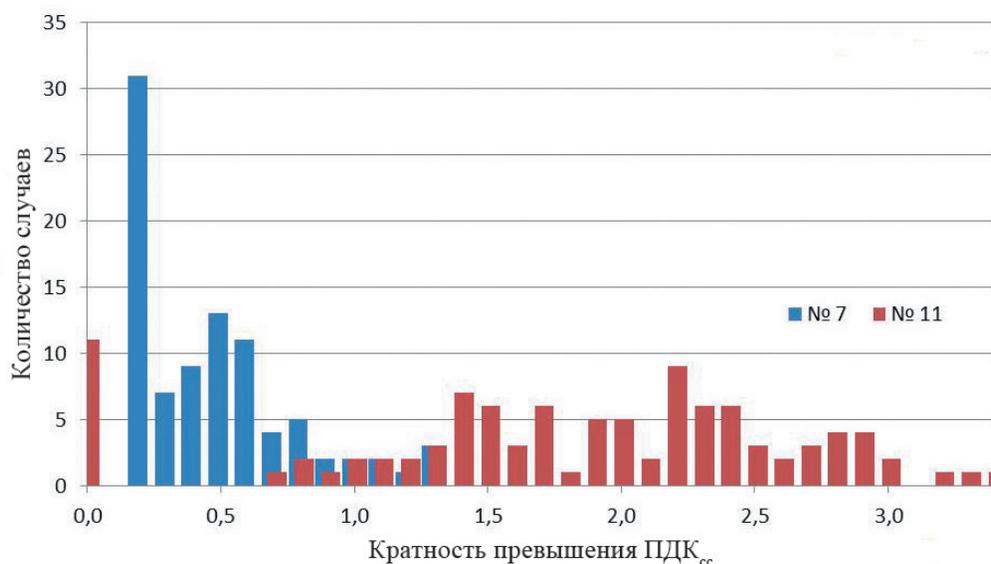


Рис. 4. Распределение ПКО в зимний период в центре (станция № 7) и на периферии (станция № 11) Санкт-Петербурга.

Fig. 4. Distribution of SOC in the winter in the center and on the periphery of St. Petersburg.

гистограмма распределений ПКО за зиму на станции № 7 в центре города и на станции № 11 на периферии (Сестрорецк). Заметны различия в распределениях ПКО: близкое к экспоненциальному на центральной станции с выраженной модой около 6 мкг/м^3 ($0,2 \text{ ПДК}_{\text{сс}}$) и левосторонняя асимметрия с дисперсией в два раза большей в пригороде.

Годовая динамика ПКО на всех станциях Санкт-Петербурга представлена на рис. 5. Наиболее высокие уровни ПКО фиксируются на расстоянии 27 км к северо-западу от центра города (станция № 11 в Сестрорецке), на расстоянии 25 км к юго-востоку от центра (станция № 17 в Пушкине) и на расстоянии 20 км (станция № 25 в Металлострое). Эти станции расположены в пригородах на территории распространения шлейфов загрязненного воздуха.

На большинстве станций наблюдаются два сезонных максимума — весенний (март—апрель) и летний (июнь). Считается [8, 9], что максимумы ПКО имеют разную природу: первый связан с усилением стратосферно-тропосферного обмена и вертикального перемешивания между приземным слоем и свободной тропосферой; второй обусловлен в большей мере фотохимическим образованием озона. Поскольку вблизи максимумов временной ход приземного озона имеет сложную форму, можно говорить лишь о преобладании того или иного механизма генерации озона в зависимости от местных условий, в которых находится станция.

По соотношению амплитуды весеннего и летнему максимумов станции Санкт-Петербурга можно разделить на три группы. Отношение, близкое

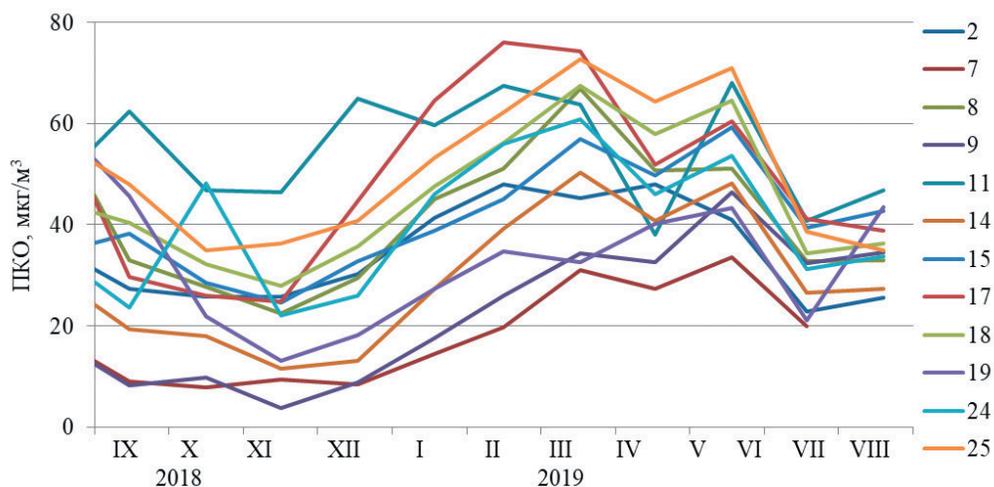


Рис. 5. Сезонная динамика ПКО на 12 станциях Санкт-Петербурга.

Fig. 5. Seasonal dynamics of SOC at 12 stations in St. Petersburg.

к единице (амплитуды весеннего и летнего максимумов равны), наблюдается на семи станциях из двенадцати. На трех станциях (№ 2, 8 и 17), две из которых находятся в пригороде, амплитуда весеннего максимума превышает амплитуду летнего максимума более чем в 1,2 раза, причем на станции № 2 (станция на юго-востоке, самая дальняя от центра города) летнее повышение вовсе отсутствовало. Отсутствие ярко выраженного летнего повышения ПКО связано, по-видимому, с местоположением станций — вдали от дорог и промышленных предприятий. На двух станциях (№ 9 и 19), находящихся в непосредственной близости от кольцевой автодороги Санкт-Петербурга, картина обратная: либо существует только летний максимум (как на станции № 19), либо амплитуда летнего максимума превышает амплитуду весеннего более чем в 1,2 раза (как на станции № 9). Это подтверждает преобладающую роль антропогенного загрязнения атмосферы, связанного с выбросами автотранспорта, в механизме фотохимической генерации озона.

Сезонный минимум проявляется более четко: на всех станциях Санкт-Петербурга он начинается в июле и продолжается до декабря, т. е. с понижением температуры уменьшается интенсивность образования озона из загрязненного воздуха.

В целом по городу годовой ход средней ПКО хорошо согласуется с динамикой числа солнечных дней (рис. 6). Так, максимальное покрытие небосвода облаками в Санкт-Петербурге (более 80 %) наблюдалось в декабре, что соответствует минимуму ПКО в этом месяце.

Два пика ПКО — в апреле и июне — приходятся на периоды минимального покрытия небосвода облаками (30 и 40 % соответственно).

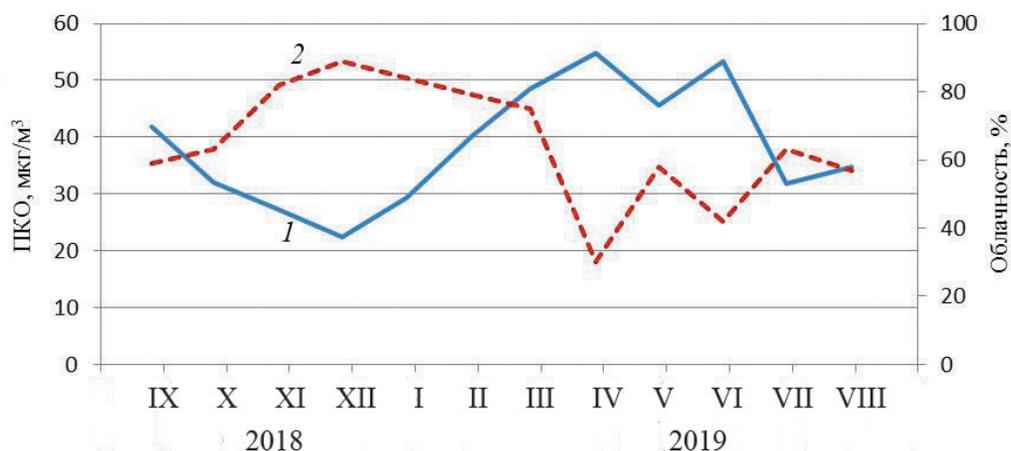


Рис. 6. Годовой ход средней концентрации озона (1) и количество облачности (2) в Санкт-Петербурге по данным Архива погоды в Санкт-Петербурге (<http://www.rp5.ru>) в период сентябрь 2018 г. — август 2019 г.

Fig. 6. The annual course of the average ozone concentration (1) and cloud amount (2) in St. Petersburg during September 2018 — August 2019.

Анализ пространственных максимумов O₃

Для анализа пространственного распределения тропосферного озона в воздухе Санкт-Петербурга была выполнена интерполяция среднемесячных значений ПКО методом обратных расстояний [6, 10] и построены изолинии за каждый месяц. На рис. 7 приведены распределения ПКО в период с сентября 2018 по август 2019 г.

Для эффективного сравнения на каждом поле проведены изолинии содержания озона 30 мкг/м³ и далее с шагом 15 мкг/м³. Под полями изолиний ПКО на рис. 7 указано число жителей Санкт-Петербурга (тыс. чел.), проживающих на территории с уровнем загрязнения озонном выше предельно допустимого значения.

Наиболее «чистой» территория Санкт-Петербурга является в конце осени — начале зимы: на большей части города ПКО не превышает 1 ПДК_{сс}. Отдельные области повышенных значений располагаются на северном берегу Финского залива. Низкие значения ПКО в этот период года обусловлены коротким световым днем и, соответственно, минимумом ультрафиолета, что препятствует фотохимическим реакциям образования озона. Уменьшению ПКО способствуют большая повторяемость высоких скоростей ветра и повышенная влажность. Высокая влажность приводит к увеличению содержания влажных аэрозолей, на которых озон разрушается особенно быстро.

В январе увеличиваются размеры юго-восточной и северо-западной зон повышенного загрязнения приземным озоном, которые в декабре лишь обозначены.

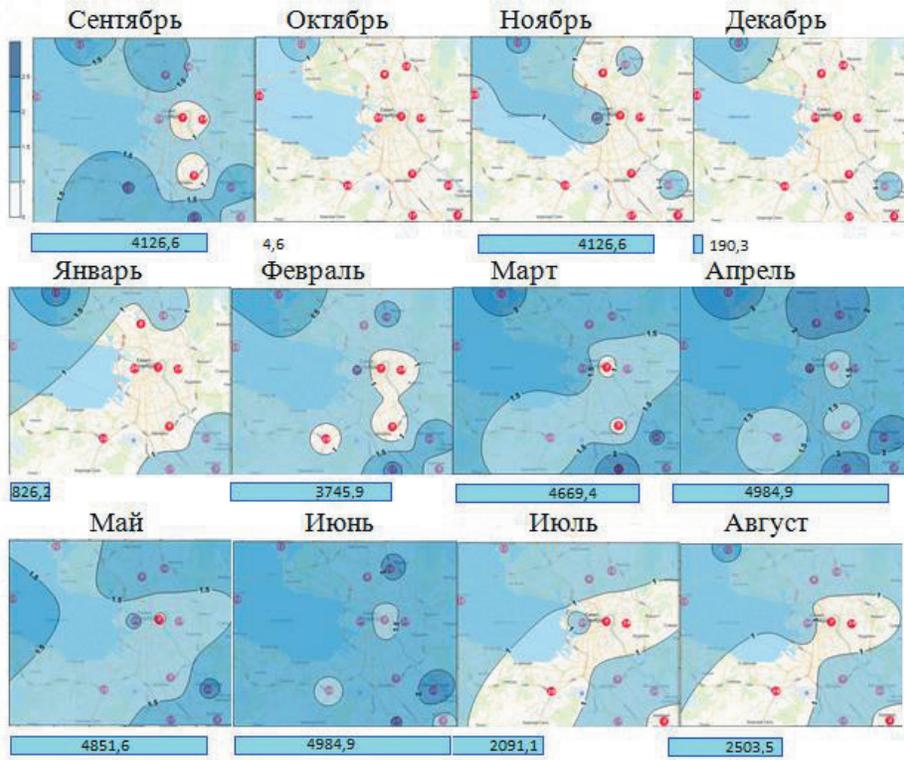


Рис. 7. Поля изолиний содержания приземного озона в Санкт-Петербурге и число жителей города (тыс. чел.), проживающих на территории с ПКО выше ПДК_{сс}.

Fig. 7. Isolines fields of the surface ozone content in St. Petersburg and the population living in the territory with SOC above MAC thousands of people.

В феврале эти зоны смыкаются, образуя в центре города овальную «чистую» область. Стагнация воздуха и накоплению загрязняющих веществ способствует большая повторяемость зимних инверсий.

Далее всю весну и начало лета на всей территории города ПКО превышает ПДК_{сс}, чему способствует высокая температура [4], влияющая на интенсивность вертикального перемешивания, эмиссию предшественников озона, скорость химических реакций. Особенно существенное загрязнение по-прежнему наблюдается на северо-западе и юго-востоке города. Это, по-видимому, связано с тем, что при удалении от города в более чистые районы происходит увеличение эмиссии летучих углеводородов, дающих пероксильные радикалы [11], которые способствуют уменьшению скорости разрушения озона.

В июле и августе наблюдается квазиовальная «чистая» область, вытянутая с северо-востока на юго-запад. Летом скорость ветра меньше, и это способствует ослаблению горизонтального переноса и накоплению загрязнителей в местах

выбросов. Наличие водоемов (Финский залив, Нева) приводит к возникновению циркуляции бризового типа, которая также может формировать температурные инверсии, запирающие загрязнители вблизи поверхности.

Число жителей, подвергающихся воздействию ЗВ, изменяется от 4,6 тыс. в октябре до почти 5 млн в апреле и июне.

Соответствие ПКО в Санкт-Петербурге национальным стандартам качества воздуха

В Нормативах для РФ установлены два равноправных значения ПДК для озона. Проведенное исследование показало, что в течение всего рассматриваемого периода (2018—2019 гг.) на территории Санкт-Петербурга существуют области, где показатель ПДК_{сс} превышен, и, таким образом, атмосферный воздух города следует считать опасным для здоровья жителей в течение практически всего года. Сделанный вывод требует принятия каких-либо решений — либо защиты населения от токсичного воздействия ПКО, либо пересмотра нормативов качества воздуха.

Аналогичная ситуация наблюдается в Московском регионе и Мурманской области, где среднесуточные значения ПКО превышают предельно допустимую среднесуточную концентрацию 95 % дней в году [12]. Среднегодовая концентрация озона превышает 30 мкг/м³ практически на всей территории Западной Европы [1].

Отметим, что уровень остальных четырех ЗВ, отнесенных ВОЗ к наиболее опасным, редко превышает установленные для них ПДК_{сс}. На рис. 8 представлены среднегодовые значения концентрации всех пяти основных ЗВ в долях ПДК_{сс}. Из рисунка видно, насколько озон выбивается из общей картины.

Нормирование концентрации озона по его среднесуточному значению принято только в РФ и некоторых странах СНГ. Если придерживаться норм Беларуси, то случаев превышения ПКО в Санкт-Петербурге за рассматриваемый период не отмечалось, поскольку там норма в три раза выше и составляет 90 мкг/м³ [1]. За рубежом в качестве оценки загрязнения воздуха озоном используется скользящее среднее за восемь часов значение концентрации (рассчитываемое по среднечасовым значениям) [13]. Выбор восьмичасового интервала обусловлен средним временем пребывания человека на открытом воздухе.

Другой нормирующий показатель качества воздуха в РФ — предельно допустимая максимальная разовая концентрация озона (МДК_{мр}) — в Санкт-Петербурге за рассматриваемый период времени не был превышен ни разу. В работах [14, 15] отмечается, что в России случаи превышения ПДК_{мр} отмечаются нечасто.

Поскольку фотохимическое образование озона происходит в дневные часы, а ночью озон разрушается за счет стока в газовых реакциях с теми же оксидами азота и углеводородами [12], среднесуточные ПКО сглаживают высокие дневные значения приземной концентрации озона и могут оказаться близкими к фоновым значениям. Авторы в работе [12] также указывают на недостаточную физическую обоснованность норматива ПДК_{сс}, что требует его отмены или,

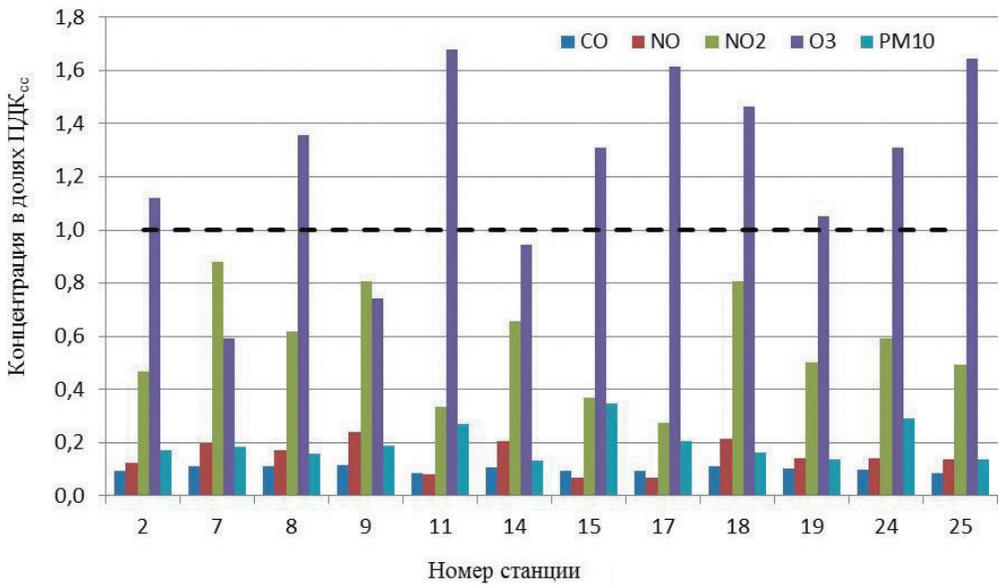


Рис. 8. Пять основных ЗВ в долях ПДК_{сс} за период 2018—2019 гг. в Санкт-Петербурге по данным www.infoeco.ru.

Fig. 8. Five main pollutants in the shares of MAC in St. Petersburg, www.infoeco.ru.

по крайней мере, пересмотра его численного значения с учетом результатов современных исследований влияния озона на здоровье населения и международного опыта.

Заключение

В результате мезомасштабного пространственно-временного исследования приземного озона в воздухе Санкт-Петербурга в 2018—2019 гг. сделаны следующие выводы.

Содержание озона в тропосфере пригородов Санкт-Петербурга, как и других мегаполисов, выше, чем в самом городе, практически в течение всего года. Область пониженных значений ПКО представляет собой квазиокружность, диаметр которой уменьшается к весеннему (апрель) и летнему (июнь) повышению ПКО. Рост концентрации O_3 отмечен в направлениях на северо-запад и юго-восток от центра. Это обусловлено высоким уровнем загрязненности воздуха предшественниками озона, присутствующими в городских условиях вблизи автомагистралей и на перекрестках, что приводит к сдвигу равновесия комплекса фотохимических реакций, обуславливающих образование и связывание озона, в сторону уменьшения его содержания в атмосфере. На периферии города возрастает роль других факторов — солнечного излучения, температуры и влажности воздуха, процессов перемешивания воздуха. Сочетание этих факторов при невысоком уровне

загрязнения атмосферы приводит к повышению содержания озона. В более чистых районах скорость разрушения озона уменьшается также за счет увеличения эмиссии летучих углеводородов.

Показано, что при существующих значениях ПДК_{сс}, равных 30 мкг/м³, в ряде районов на территории Санкт-Петербурга ПКО превышает 1 ПДК_{сс} в течение практически всего года, а в апреле и июне это отмечается на всей территории города. Численность населения, проживающего на загрязненной озоном территории, составляет 190 тыс. жителей в декабре и возрастает в 26 раз к апрелю—июню. Этот факт доказывает необходимость принятия экстренных мер по защите населения либо пересмотра действующих в РФ нормативов.

Обнаружена взаимосвязь длительности периода повышения уровня ПКО и среднего значения ПКО, которую удалось аппроксимировать логарифмической функцией.

Показано, что в течение всего года в Санкт-Петербурге наблюдается статистически значимая отрицательная связь концентрации тропосферного озона с концентрацией диоксида азота.

Список литературы

1. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979—2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 800—809.
2. Котельников С.Н., Степанов Е.В. Мониторинг тропосферного озона в атмосфере мегаполисов и малоурбанизированных районов // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. 2015. Т. 71. С. 43—71.
3. Котельников С.Н., Степанов Е.В., Ивашкин В.Т. Приземные концентрации озона и здоровье различных возрастных групп населения в г. Москве летом 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 4. С. 26—38.
4. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. и др. Актуальность наблюдений и прогноза приземного озона в России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29, № 1. С. 89—106.
5. Monks P.S., et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 8889—8973.
6. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 1. С. 144—151.
7. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Приземный озон в Крыму // Пространство и Время. 2014. № 2(16). С. 254—257.
8. Латышева И.В., Лощенко К.А., Миллер Е.В. Современные особенности распределения озона в Иркутске // Известия ИГУ. Сер.: Науки о Земле. 2011. Т. 4, № 1. С. 146—163.
9. Котельников С.Н., Степанов Е.В., Челибанов В.П. Пространственно-временная изменчивость приземного озона в Санкт-Петербурге, Кировской области и Крыму в 2011—2012 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1086—1089.
10. Симакина Т.Е., Крюкова С.В. Районирование территории Санкт-Петербурга по приземному озону в зимний период // Общество. Среда. Развитие. 2019. № 4. С. 97—103.
11. Котельников С.Н. Основные механизмы взаимодействия озона с живыми системами и особенности проблемы приземного озона для России // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. 2015. Т. 71. С. 10—41.
12. Демин В.И., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. О действующих в Российской Федерации нормативах по содержанию озона в атмосферном воздухе // Экология человека. 2009. № 1. С. 4—8.
13. Bloomer B.J., et al. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions // Geophysical research letters. 2009. V. 36. L09803.

14. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М. и др. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2005 г. // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 2. С. 119—124.
15. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. и др. Причины и факторы положительных аномалий приземной концентрации озона в Московском регионе и на Юго-Восточном побережье Крыма // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29, № 6. С. 493—502.

References

1. Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Peshin S. Total ozone content variability and trends during 1979—2014. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the atmosphere and ocean. 2015, 28(9): 800—809. [In Russian]. doi: 10.15372/AOO20150905
2. Kotelnikov S.N. Stepanov E.V. Monitoring of tropospheric ozone in the atmosphere of megalopolises and low-urban areas. *Trudy instituta obshchey fiziki im. A.M. Prokhorova RAN*. Proceedings of the Institute of General Physics. A.M. Prokhorov RAS. 2015, 71: 43—71. [In Russian]. doi: 10.21455/GPB2019.4-3
3. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V., Ivashkin V.T. Surface concentrations of ozone and health of various age groups in Moscow in the summer 2010. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*. Geophysical Processes and the Biosphere. 2019, 18 (4): 26—38. [In Russian]. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-3>
4. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu. et al. Relevance of observations and prediction of surface ozone in Russia. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Environmental monitoring and ecosystem modeling problems. 2018, 29(1): 89—106. [In Russian]. doi: 10.21513/0207-2564-2018-1-89-106.
5. Monks P.S. et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15: 8889—8973. doi:10.5194/acp-15-8889-2015.
6. Kryukova S.V., Simakina T.E. Assessment of meteorological data spatial interpolation methods. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*. Society. Environment. Development. 2018, 1: 144—151. [In Russian].
7. Lapchenko V.A., Zvyagintsev A.M. Ground-level ozone in Crimea. *Prostranstvo i Vremya*. Space and time. 2014, 2 (16): 254—257. [In Russian].
8. Lатышева И.В., Лосченко К.А., Миллер Е.В. Modern features of the ozone distribution in Irkutsk. *Izvestiya IGU. Ser. Nauki o Zemle*. Izvestia ISU. Ser. “Earth Sciences”. 2011, 4(1): 146—163. [In Russian].
9. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V., Chelibanov V.P. Spatial and temporal variability of ground-level ozone in St. Petersburg, the Kirov region, and Crimea in 2011—2012. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the atmosphere and ocean. 2016, 29 (12): 1086—1089. [In Russian]. doi: 10.15372/AOO20161213
10. Simakina T.E., Kryukova S.V. Zoning of the St. Petersburg territory on surface ozone in the winter. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*. Society. Environment. Development. 2019, 4: 97—103. [In Russian].
11. Kotelnikov S.N. The main mechanisms of interaction of ozone with living systems and features of the problem of surface ozone for Russia. *Trudy instituta obshchey fiziki im. A.M. Prokhorova RAN*. Proceedings of the Institute of General Physics. A.M. Prokhorov RAS. 2015, 71: 10—41. [In Russian].
12. Demin V.I., Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N. About the standards in the Russian Federation on the ozone content in atmospheric air. *Ekologiya cheloveka*. Human ecology. 2009, 1: 4—8. [In Russian].
13. Bloomer B.J., et al. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions. *Geophysical research letters*. 2009, 36: L09803. doi:10.1029/2009GL037308.
14. Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kruchenitsky G.M. et al. Ozone content over the territory of the Russian Federation in 2005. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2006, 2: 119—124. [In Russian].
15. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu. et al. Causes and factors of positive anomalies of surface ozone concentration in the Moscow region and on the South-East coast of Crimea. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the atmosphere and ocean. 2016. 29(6): 493—502. [In Russian]. doi: 10.15372/AOO20160608.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 13.07.2020
Принята к публикации 27.09.2020*

Сведения об авторах

Симакина Татьяна Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, tatiana.simakina@gmail.com.

Крюкова Светлана Викторовна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, krukos@rambler.ru.

Information about authors

Simakina Tatyana Evgenievna, PhD (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Kryukova Svetlana Victorovna, PhD (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Анализ природно-климатических рисков видов экономической деятельности в Российской Федерации

Е.Н. Яковлева¹, Н.Н. Яшалова², В.С. Васильцов²

¹ Вологодский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», Вологда

² Череповецкий государственный университет, Череповец, natalij2005@mail.ru

Для определения приоритетов и выработки эффективных механизмов адаптации различных секторов экономики к изменению климата необходимо решить метеорологические проблемы. В настоящей работе выполнена апробация авторской методики оценки климатической безопасности укрупненных видов экономической деятельности Российской Федерации. Анализ в координатах энергоёмкость—климатоёмкость позволил выявить секторы промышленности, подверженные наибольшему природно-климатическим рискам.

Ключевые слова: природно-климатические риски, климатическая безопасность, климатоёмкость, энергоёмкость, климатическая устойчивость.

Analysis of climate security of economic activities in the Russian Federation

E.N. Yakovleva¹, N.N. Yashalova², V.S. Vasil'tsov²

¹ Vologda branch of the Presidential Academy, Vologda, Russia

² Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

The top ten global factors that determine the development of the world community in the medium and long term include the climate change, resulting in many unsolved conceptual and applied problems of further accounting and management of climate threats and opportunities in the development of the national economy. To determine priorities and develop effective mechanisms for adapting various sectors of economy to the climate change, meteorological problems need to be solved. In this paper, we have tested the author's methodology for assessing the climate security of enlarged types of economic activity in the Russian Federation. The analysis in the «energy intensity-climate intensity» terms has allowed us to identify the industries with the greatest natural and climate risk. In the future, when implementing mechanisms for managing natural and climate risks in our country, priority should be given to improving the safety of the extractive (production of oil, gas, coal and other minerals) and power industry, as well as those territories where these types of economic activities are developed. The results of the study can be used to improve the effectiveness of national and regional climate policies.

Keywords: climate risks, climatic safety, klimatoyemkost, power consumption, climatic stability.

For citation: *E.N. Yakovleva, N.N. Yashalova, V.S. Vasil'tsov.* Analysis of climate security of economic activities in the Russian Federation. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 61: 421—436. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-421-436

Введение

По мнению многих отечественных и зарубежных авторов, современное общество недооценивает уровень климатических рисков¹ ([1—4] и др.) и роль своего негативного влияния на климат ([5—9] и др.). Так, П. Хиггинс и Дж. Харт [8] утверждают, что стабилизация концентрации парниковых газов на «безопасном» уровне требует гораздо более низкой их антропогенной эмиссии [10]. В.Н. Малинин, С.М. Гордеева и Л.М. Наумов [11] обосновали вывод о гораздо менее значительном, чем принято считать, антропогенном влиянии на глобальное потепление. Три четверти парникового эффекта обусловлено влиянием водяного пара и только четвертая часть — парниковых газов (как естественного, так и техногенного происхождения) [12].

Тем не менее выбросы промышленными предприятиями углекислого газа служат фактором усиления парникового эффекта и пренебрегать этим недопустимо. Как отмечает И. Браун, антропогенное влияние приносит независимые изменения в окружающую среду наравне с естественными причинами, при этом остаются нерешенными фундаментальные проблемы в расшифровке, предсказании, оценке последствий изменения климата [13]. Для выбора целевых установок и принятия регулирующих решений по снижению антропогенного воздействия на климат необходимо адекватно оценивать природно-климатические риски как в территориальном плане, так и в разрезе видов экономической деятельности.

Формулировка проблемы

Результаты проведенного ранее исследования авторов [14] убедительно показали, что для оценки климатической безопасности² страны, территориального образования, сектора, отрасли и фирмы (т. е. любого субъекта климатического воздействия) следует применять систему количественных абсолютных и относительных показателей, которые включают такие критерии, как «климатоёмкость» и «энергоёмкость». Показатели климатоёмкости используются для оценки уровня оказываемого субъектом негативного воздействия на климат в основном в виде выбросов парниковых газов (т. е. «добавленной» климатической нагрузки), а показатели «энергоёмкости» свидетельствуют о масштабах использования наиболее климатоёмких ресурсов, к которым относятся традиционные виды энергии. Применение второй группы показателей в качестве

¹ Согласно авторской трактовке, природно-климатический риск — это вероятность возникновения и масштабы распространения негативных последствий хозяйственных решений в условиях их неопределенности в результате воздействия системы метеорологических, геологических и гидрогеологических (температура, атмосферное давление и осадки, влажность и циркуляция воздуха, землетрясения, наводнения и др.) и прочих природных факторов (пожары, падения метеоритов, инфекционные заболевания людей и животных, климатические циклы, глобальное изменение климата и т. п.) [15].

² Под климатической безопасностью здесь будем понимать состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия последствий реализации событий природно-климатического риска. Таким образом, климатическая безопасность выступает как обратная сторона природно-климатического риска.

целевых в управлении климатическими рисками позволит сократить образование загрязняющих атмосферу веществ и тем самым негативное воздействие на климат энергетики, а применение первой группы — в остальных отраслях. Применение специальной матрицы — карты климатических рисков — позволяет дать сравнительную характеристику субъекта риска одновременно по двум группам критериев [14].

Целью данного исследования является апробация авторской методики оценки природно-климатических рисков в разрезе видов экономической деятельности РФ.

Методы

Теоретическая база настоящего исследования была ранее изложена авторами [15]. В качестве методической основы выбрана авторская методика оценки природно-климатических рисков [14]. Сначала выполнен ретроспективный анализ результатов негативного воздействия секторов российской экономики на климат через показатели климатоемкости: изучена динамика и структура выбросов парниковых газов. Далее аналогичная оценка дана показателям «энергоёмкости» различных видов экономической деятельности. В завершение основные виды экономической деятельности Российской Федерации оценены в координатах энергоёмкость—климатоемкость с использованием методов группировки и средних величин. Для репрезентативности результатов исследования и получения качественных выводов в работе использован графический метод.

Результаты

1. Анализ системы показателей «климатоемкости»

Негативным результатом воздействия хозяйственной деятельности на климат в первую очередь является загрязнение атмосферы парниковыми газами. По данным Росгидромета [16], выбросы парниковых газов без учета землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) (в млн т CO₂-эквивалента в год) за период с 2009 по 2018 г. в России возросли на 13,2 %, а с учетом ЗИЗЛХ — на 23,1 %. Несмотря на разнонаправленный характер изменений, отметим, что в среднем ежегодный прирост без учета ЗИЗЛХ составлял 1,39 %, причем в 2018 г. наблюдался максимальный за рассматриваемый период прирост — на 3 % (рис. 1).

Землепользование и лесное хозяйство, имея отрицательное сальдо выбросов парниковых газов, уменьшает объем совокупного загрязнения за счет абсорбции (поглощения) из атмосферы больше чем на четверть (в пределах от 26,6 до 35,1 %). Можно утверждать, что относительное поглощение парниковых газов за анализируемый период сократилось на фоне роста их образования (в 2018 г. поглощение составило 26,6 против 32,5 % в 2009 г.). Оценки, выполненные авторами по данным Росстата, показали, что за тот же период средний ежегодный прирост ВВП в сопоставимых ценах составлял 1,97 %. Опережающий (хотя и незначительно) темп роста ВВП над аналогичным показателем динамики выбросов парниковых

газов за рассматриваемый период может свидетельствовать о том, что развитие экономики происходило за счет использования ресурсо- и климатосберегающих инновационных технологий, относительно меньшего вовлечения в оборот экологических ресурсов.

Можно привести ряд примеров подобных технологий: извлечение биогаза из отходов животноводства, который далее используется для выработки теплоэнергии (в Белгородской, Московской, Калужской областях)¹; широко внедряемые в России технологии «умного освещения», которые позволяют экономить электроэнергию за счет применения чувствительных к внешнему освещению датчиков и энергосберегающих ламп (например, в Вологодской области такие системы установлены даже в малых населенных пунктах); технология солнечного тепло- и энергоснабжения зданий путем облицовки их фасадов солнечными коллекторами с вакуумными стеклопакетами (русская разработка)² и многие другие. Тем не менее положительный тренд выбросов парниковых газов является неблагоприятным следствием развития экономики страны.

Структура выбросов парниковых газов в разрезе секторов практически постоянна (рис. 2).

Наибольший вклад в выбросы вносит энергетика (см. рис. 2): в рассматриваемом периоде он колеблется в небольшом диапазоне — от 78,9 до 81,2 %. Рост выбросов парниковых газов, осуществляемых в этом секторе, с 2009 по 2018 г. составил 110,6 %. Остальные секторы экономики осуществляют выбросы в объеме на порядок ниже энергетике, но два сектора из оставшихся трех имеют более крутой восходящий тренд: базисный темп роста по сектору «Отходы» составил 127,4 %, а по сектору «Промышленные процессы и использование продукции» — 134,7 %.

Структура выбросов по составу за тот же десятилетний период достаточно стабильна (рис. 3).

В составе выбросов парниковых газов преобладает диоксид углерода: его доля в совокупных выбросах колеблется в пределах от 76,2 до 78,6 %. Второе место принадлежит метану — от 17,0 до 17,8 %. На остальные парниковые газы приходится менее 5 % эквивалентных выбросов. Однако среднегодовые темпы роста выбросов метана опережают аналогичный показатель по углекислоте (101,8 и 101,1 % соответственно). В 3,4 раза увеличилось количество выбросов гидрофторуглеродов. Выбросы перфторуглеродов по сравнению с уровнем 2009 г. снизились на 20,6 %. Прирост выбросов остальных видов парниковых газов за десять лет составил от 10 % и выше.

2. Анализ системы показателей «энергоёмкости»

В 2018 г. выбросы парниковых газов, обусловленные работой предприятий энергетике, в РФ составили 1752,6 млн т CO₂-эквивалента в год [16], или 78,94 % совокупных выбросов (без учета ЗИЗЛХ). Основная их масса (99,7 %)

¹ Развитие биогазовой энергетики в регионах. 2016. URL: http://ccgs.ru/publications/presentations/_download/development_biogas_energy.pdf.

² Инновационные энергетические технологии URL: <https://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item/инновационные-энергетические-технологии>.

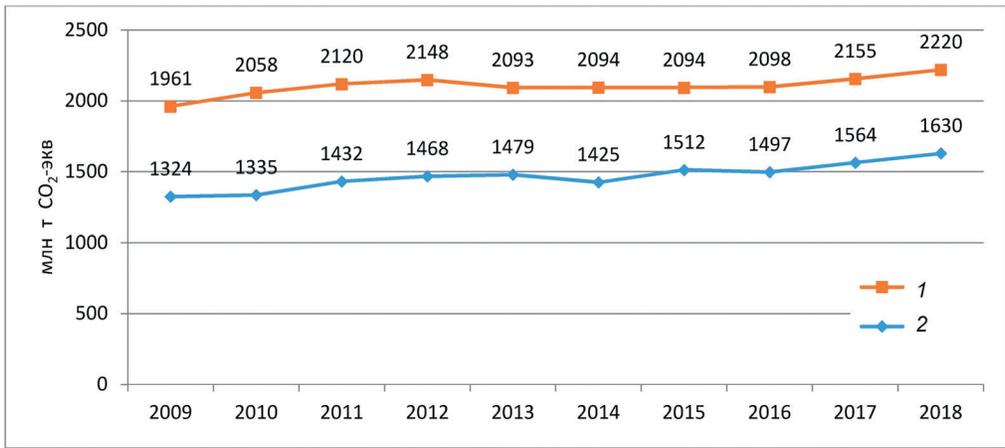


Рис. 1. Динамика выбросов парниковых газов в Российской Федерации (млн т CO₂-эквивалента в год) [16].

1 — всего без учета землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства,
2 — всего с учетом землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства.

Fig. 1. Dynamics of greenhouse gas emissions in the Russian Federation, (million tons of carbon dioxide equivalent per year) [16].

1 — total excluding land use, land use change and forestry,
2 — total taking into account land use, land use change and forestry.

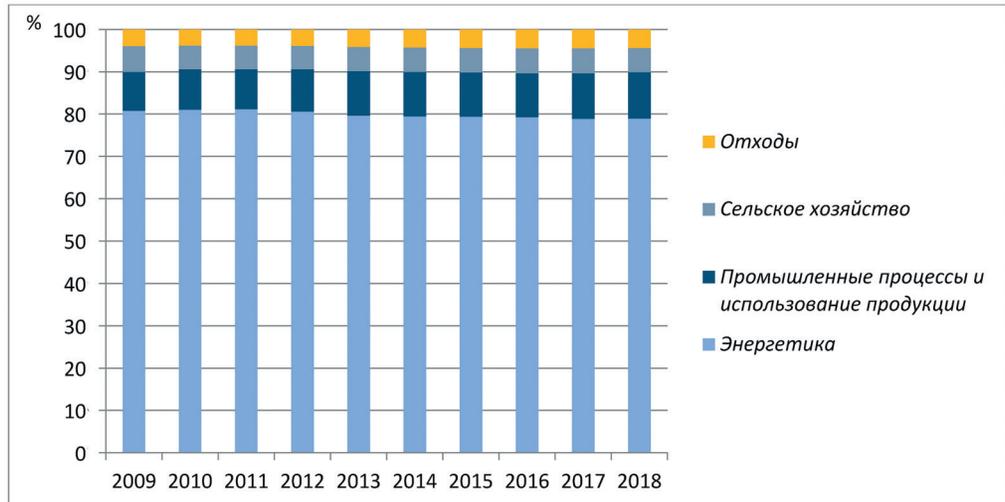


Рис. 2. Структура выбросов парниковых газов в разрезе секторов экономики (без учета землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства) [16].

Fig. 2. Structure of greenhouse gas emissions by economic sector (excluding land use, land-use change and forestry), interest [16].

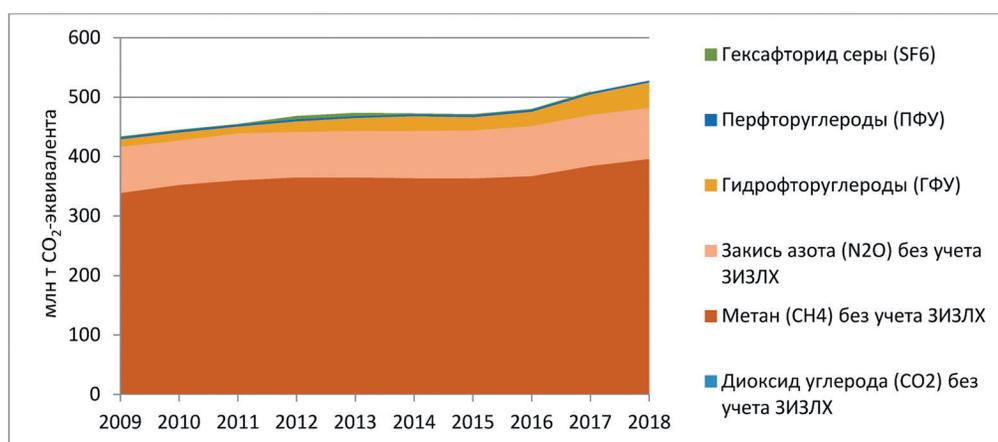


Рис. 3. Динамика и структура выбросов парниковых газов по составу (млн тонн CO₂-эквивалента в год) [16].

Fig. 3. Dynamics and structure of greenhouse gas emissions by composition (million tons of CO₂-equivalent per year) [16].

представлена углекислым газом [16], выбросы которого в анализируемом периоде незначительно колеблются вокруг возрастающего тренда (рис. 4).

Выбросы парниковых газов не превышают 66 % уровня 1990 г. (см. рис. 4). Существенное сокращение выбросов вредных веществ, в том числе парниковых газов, произошло в 1990-е годы по причине введения в нашей стране в 1992 г. механизма платы за загрязнение окружающей природной среды [17]. Затем объем загрязнения в связи с появившейся тенденцией роста экономики в начале XXI века начал постепенно увеличиваться.

Очередное падение наблюдалось в 2009 г. [16] в связи с экономическим кризисом 2008 г., после чего возрастающий тренд возобновился (рис. 4). Тем не менее темпы роста потребления электроэнергии в стране значительно выше темпов роста выбросов CO₂. Данный факт объясняется двумя причинами: во-первых, увеличением доли энергоресурсов, производимых с использованием возобновляемых источников энергии (с 2012 по 2018 г. эта доля выросла с 15,5 до 17,2 % [18]); во-вторых, изменением структуры потребляемых в энергетике видов топлива в пользу более экологичного природного газа (с 1995 по 2018 г. потребление твердого топлива сократилось почти на треть, торфа — на две трети, а использование газа возросло более чем на 20 % [16]).

Поскольку энергетика вносит наибольший вклад в загрязнение атмосферы парниковыми газами, энергопотребление национальной экономики является ключевым фактором ее природно-климатического риска. Следовательно, целесообразно изучить показатели энергоэффективности народного хозяйства Российской Федерации в разрезе секторов.

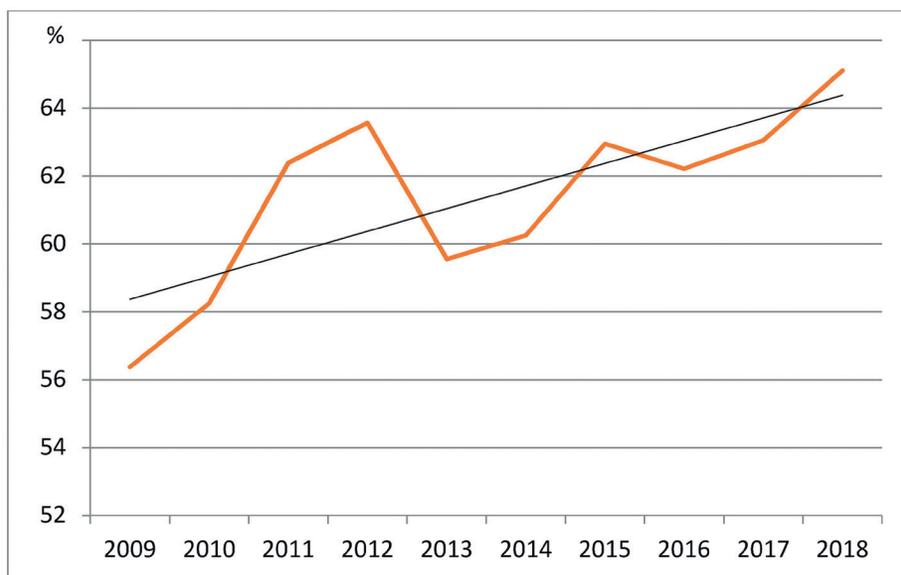


Рис. 4. Динамика выбросов CO₂ в России по отношению к 1990 г. (%) и линия тренда показателя [16].

Fig. 4. Dynamics of CO₂ emissions in Russia by 1990 (%) and trend line indicator [16].

В структуре потребления электроэнергии промышленными предприятиями более 50 % приходится на двигательную силу за счет таких видов экономической деятельности, как добыча полезных ископаемых, водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений (рис. 5).

Около четверти потребления приходится на технологические нужды в основном в обрабатывающих производствах. Пятая часть электроэнергии тратится на собственные нужды электростанций, освещение и потери в сетях. Причем структура потребления в последние пять лет достаточно стабильна. Представленный в официальной статистике показатель потребления топливно-энергетических ресурсов на одного занятого в экономике не может характеризовать ее энергоэффективность. Само по себе его значение мало о чем свидетельствует, но сравнение в динамике и в отраслевом разрезе может представлять интерес (табл. 1).

Чем больше ручного труда присутствует в отрасли, тем ниже значение этого показателя: наименьшим он является в таких отраслях, как сельское и лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство, а также строительство. Увеличение данного показателя может свидетельствовать о повышении уровня механизации и автоматизации производства или о снижении энергоэффективности. Достаточно стабильная динамика потребления топливно-энергетических ресурсов на одного занятого при одновременном росте производительности труда в целом

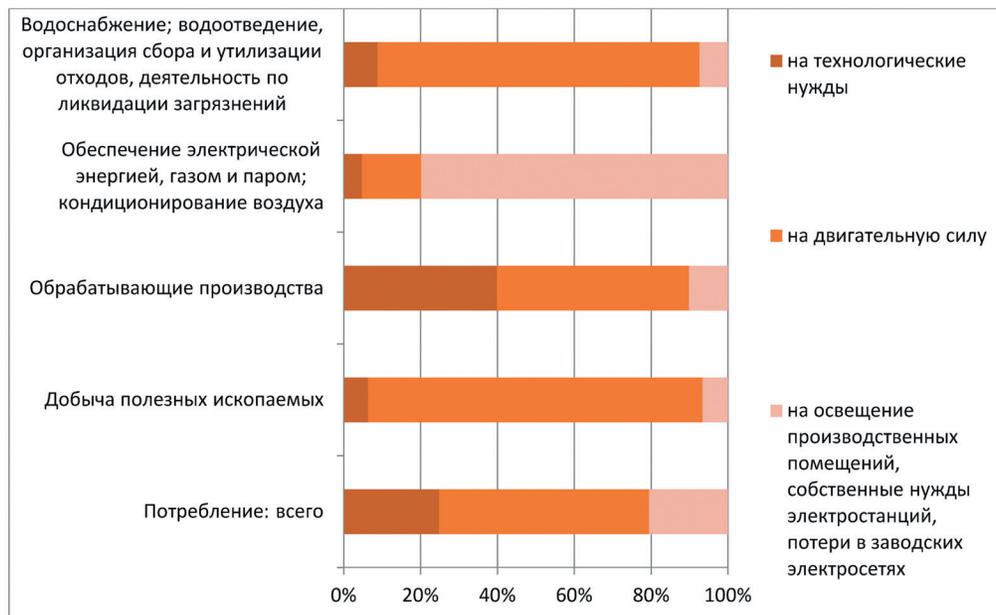


Рис. 5. Структура потребления электроэнергии промышленными предприятиями (%) в Российской Федерации в 2018 г. [18].

Fig. 5. Structure of electricity consumption of industrial organizations by industry and total (%) in the Russian Federation in 2018, interest [18].

Таблица 1

Потребление топливно-энергетических ресурсов (т.у.т.) на одного занятого в экономике Российской Федерации по видам экономической деятельности [18]
 Fuel and energy resources consumed per country employed in the economy by type of economic activity, tons of conventional fuel

Виды экономической деятельности	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Средний темп прироста, %
Всего в экономике страны	13,0	12,8	13,1	13,0	12,5	12,8	13,1	0,1
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	2,9	2,4	2,8	2,5	3,0	3,5	3,7	4,1
Рыболовство, рыбоводство	8,3	7,9	7,7	7,2	11,6	-	-	8,7
Добыча полезных ископаемых	62,9	63,9	72,8	72,8	72,5	69,7	71,4	2,1
Обрабатывающие производства	29,0	28,9	28,7	27,9	27,1	28,0	28,2	-0,5
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	30,1	28,9	30,5	32,2	32,0	28,1	29,2	-0,5
Строительство	2,2	2,3	2,3	2,7	3,6	3,7	2,6	2,8
Транспорт и связь	21,0	20,5	20,1	19,6	18,6	21,6	21,5	0,4
Прочие виды деятельности	8,8	8,5	8,7	8,7	8,0	8,2	8,9	0,2

Примечание. Величина показателя по Российской Федерации меньше величины показателя по отдельным видам экономической деятельности из-за изменения в них пропорции объема конечного потребления топливно-энергетических ресурсов (в тоннах условного топлива) и численности занятых.

в экономике страны также оценивается нами как результат проводимой политики энергосбережения.

3. Оценка климатической безопасности видов экономической деятельности Российской Федерации в координатах энергоёмкость—климатоёмкость

Ранее авторами была предложена методика оценки климатической безопасности на основе сопоставления двух групп показателей природно-климатического риска [14]. Первая группа показателей, объединённых термином «энергоёмкость», характеризует использование климатоёмких ресурсов, в основном карбоёмкое энергопотребление (энергоёмкость, энергопотребление, доля безуглеродных видов топлива в энергопотреблении, карбоёмкость энергопотребления и др.). Вторая группа — показатели климатоёмкости, характеризующие абсолютную или относительную величину негативного воздействия на климат путем загрязнения атмосферы парниковыми газами (выбросы углерода, выбросы парниковых газов, соотношение затрат на снижение выбросов парниковых газов к валовому продукту и др.).

Логика группировки состояла в следующем. Любая хозяйственная деятельность оказывает двойное негативное воздействие на климат. Во-первых, субъект экономики использует материальные ресурсы (в первую очередь энергию), процессы производства и добычи которых связаны с выбросами парниковых газов, во-вторых, субъект сам может осуществлять такие выбросы.

Согласно авторской методике, оценке подлежит только одно качество климатической безопасности субъекта экономики, а именно опасность его хозяйственной деятельности для климата. Это качество было определено нами как эндогенное, относительно хорошо поддающееся корректировке путем применения определенных механизмов и инструментов риск-менеджмента. Второе качество, экзогенное, — это способность экономических субъектов противостоять нарастающим природно-климатическим рискам. Оно зависит от достоверности прогнозирования природно-климатических рисков и адаптационного потенциала субъекта.

Ключевую роль в обеспечении управления вторым качеством играют внешние факторы — эффективность инструментов и институтов прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений, географическое положение и отраслевые особенности функционирования субъекта, международная и национальная климатическая политика и т. д. Управление данной составляющей климатической безопасности представляется делом гораздо более сложным и проблематичным, требующим комплексного, инновационного подхода. Поэтому авторы пришли к мнению, что первоочередной задачей климатической политики на корпоративном, отраслевом, народнохозяйственном, местном, региональном, национальном и даже международном уровне является сокращение антропогенного вклада в парниковый эффект (эндогенная составляющая управления климатической безопасностью). Для выбора приоритетов и оценки качества работы в этом направлении и была предложена авторская методика, которую апробируем далее на примере экономических секторов.

В Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским

протоколом, за 1990—2018 г. (далее — Доклад) [16] отражен показатель «выбросы парниковых газов по секторам (млн т CO_2 -эквивалента в год)», который подходит для вычисления критерия климатоемкости. Однако выделенные секторы (энергетика, промышленные процессы, сельское хозяйство, землепользование и отходы) не в полной мере соответствуют видам экономической деятельности, в разрезе которых ведется статистический учет показателей энергозатрат Росстатом [18].

Для преодоления трудностей соотнесения данных двух источников, предпримем следующее. В Докладе в составе сектора «Энергетика» учтен сектор «Транспорт», по которому приведен суммарный выброс парниковых газов в 2018 г. В дальнейших расчетах выбросы по последнему станем учитывать отдельно, исключив из сектора «Энергетика». Так же поступим с сектором «Добыча полезных ископаемых», данные о выбросах по которому включены в секторы «Энергетика» и «Промышленные процессы и использование продукции» и показаны в составе последних на 2018 г. в Докладе. Кроме того, условно поставим равенство между видом экономической деятельности «водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений», по которому учтен в официальной статистике показатель энергозатрат, и сектором «отходы», по которому отражены выбросы парниковых газов в Докладе. Такое допущение, на наш взгляд, вполне обосновано, поскольку по сектору «Отходы» в Докладе учтены такие выбросы парниковых газов, как CH_4 от захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов на свалках и полигонах, CH_4 и N_2O от биологической обработки отходов, CH_4 от очистки коммунально-бытовых и промышленных сточных вод, N_2O от сброса бытовых стоков в водные объекты. Значит, учитываются выбросы по тем же видам деятельности, что и Росстатом: водоснабжение, водоотведение, сбор и утилизация отходов, ликвидация загрязнений.

Таким образом, проводя параллели с учетом принятых допущений между учетными данными по секторам в Докладе [16] и видам экономической деятельности Росстата [18], выполним расчет показателей энергоемкости и климатоемкости [14] в разрезе шести секторов: «Отходы», «Сельское хозяйство», «Энергетика», «Добыча полезных ископаемых», «Обрабатывающие производства», «Транспорт»¹.

Для оценки «энергоемкости» [14] применим в качестве критерия показатель официальной статистики «Потреблено топливно-энергетических ресурсов на одного занятого в экономике страны по видам экономической деятельности, т.у.т.» за 2018 г. В качестве критерия климатоемкости [14] вычислим относительный показатель выбросов парниковых газов по секторам в тоннах CO_2 -эквивалента в год, приходящихся на 1 млн рублей оборота организаций. По результатам выполненных вычислений составим матрицу климатических рисков секторов экономики (видов экономической деятельности) Российской Федерации за 2018 г. (табл. 2). Граничные значения шкалы показателей для группировки секторов по

¹ В соответствии с принятыми допущениями в данной работе термины «сектор экономики» и «вид экономической деятельности» используются как синонимы.

Таблица 2

Группировка секторов экономики по уровню климатической безопасности по данным за 2018 г. (матрица климатических рисков) [16, 18]

Grouping of economic activities by climate safety level for 2018 (climate risk matrix)

Климатоемкость	Энергоемкость		
	Низкий уровень	Средний уровень	Высокий уровень
Высокий уровень	1. Отходы 2. Сельское хозяйство*		1. Энергетика
Средний уровень		1. Транспорт	1. Добыча полезных ископаемых
Низкий уровень			1. Обрабатывающие производства

* Секторы ранжированы в порядке убывания значимости природно-климатического риска.

уровню климатической безопасности определим, рассчитав среднее арифметическое и медиану критериев климатоемкости и энергоемкости среди всех секторов в 2018 г. Результаты расчета дают следующие диапазоны шкал качественной оценки показателей.

1. *Энергоемкость* (потреблено топливно-энергетических ресурсов на одного занятого в промышленном производстве по видам экономической деятельности):

- низкий уровень — от 0 до 13,1 т.у.т. (всего в экономике страны);
- средний уровень — от 13,1 т.у.т. (всего в экономике страны) до 24,9 т.у.т. (медиана значений видов экономической деятельности);
- высокий уровень — свыше 24,9 т.у.т. (медиана значений видов экономической деятельности);

2. *Климатоемкость* (выбросы парниковых газов по секторам в тоннах CO₂-эквивалента в год на 1 млн рублей оборота организаций):

- низкий уровень — от 0 до 14,36 т CO₂-эквивалента в год на 1 млн рублей (климатоемкость промышленности в целом);
- средний уровень — от 14,36 (климатоемкость промышленности в целом) до 35,41 (медиана значений видов экономической деятельности) т CO₂-эквивалента в год на 1 млн рублей;
- высокий уровень — свыше 35,41 т CO₂-эквивалента в год на 1 млн рублей (медиана значений видов экономической деятельности).

На рис. 6 показано соотношение секторов в координатах энергоемкость—климатоемкость в 2018 г. Диаметр пузырьков пропорционален обороту организаций по видам экономической деятельности.

Из табл. 2 и рис. 6 видно, что наибольшей климатоемкостью обладает сектор «Энергетика», и, хотя его доля в экономике невелика, он выполняет важные социальные функции. Второе место по уровню негативной нагрузки на атмосферу занимает сектор «Отходы», третье — «Сельское хозяйство». Все три вида экономической деятельности попали в группу с наиболее высоким уровнем климатоемкости. Самым энергоемким видом экономической деятельности оказалась «Добыча полезных ископаемых». «Производство и распределение электроэнергии, газа и воды» также имеет энергоемкость выше средней по народному хозяйству Российской Федерации.

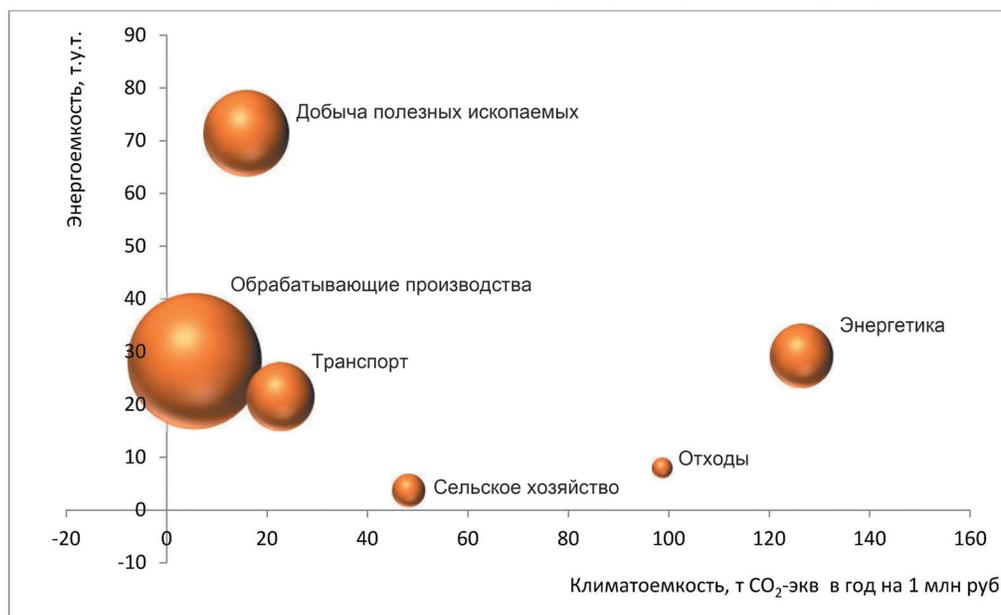


Рис. 6. Диаграмма сравнения видов экономической деятельности народного хозяйства России в координатах энергоемкость (потреблено топливно-энергетических ресурсов на одного занятого в промышленном производстве по видам экономической деятельности, т.у.т.) — климатоемкость (выбросы парниковых газов по секторам в тоннах CO₂-экв. в год на 1 млн руб. оборота организаций) в 2018 г. (диаметр пузырьков пропорционален обороту организаций) [16, 18].

Fig. 6. Diagram of comparison of types of economic activities of the national economy of Russia in coordinates «Energy intensity — Climate intensity» in 2018 (diameter of bubbles corresponds to turnover of organizations) [16, 18].

Обсуждение

По совокупности двух показателей наиболее высокие природно-климатические риски присущи энергетическому сектору экономики (обусловлено преимущественным использованием традиционных источников энергии) и добывающей промышленности (связано в основном с высокой энергоемкостью производства). Остальные из представленных видов экономической деятельности имеют средние климатические риски («Отходы», «Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство», «Транспорт», «Обработывающие производства»). Несмотря на то что транспортный сектор занимает третье место по абсолютному показателю объема выбросов парниковых газов (11,4 % совокупного выброса по данным [16]) после энергетики и добычи полезных ископаемых, в относительных единицах он имеет среднюю климатоемкость. Обработывающие производства вносят вклад в размере 10,9 % в общий объем загрязнения атмосферы парниковыми газами (четвертое

место), но, имея значительный хозяйственный оборот, демонстрируют низкий уровень климатоемкости и высокий уровень энергоемкости. К сожалению, низкими рисками не обладает ни один из рассмотренных секторов.

Таким образом, проведенный анализ климато- и энергоемкости отдельных видов экономической деятельности Российской Федерации позволил выполнить классификацию секторов по степени их потенциального влияния на изменение климата как важной составляющей природно-климатического риска. На наш взгляд, представляет научный и практический интерес применение данной методики для отраслевого анализа, что требует организации статистического учета выбросов парниковых газов и энергопотребления в разрезе отраслей народного хозяйства страны.

При дальнейшей разработке и реализации энергосберегающей и климатической политики все заинтересованные стороны (органы законодательной и исполнительной власти РФ, субъектов РФ, органы местного самоуправления) должны в качестве приоритетных направлений оценки природно-климатического риска рассматривать такие секторы народного хозяйства, как энергетика и добыча нефти, газа, угля, других полезных ископаемых, а также те территориальные образования, где расположены предприятия указанных секторов.

Выводы

Изучение рассмотренных показателей климатической безопасности российской экономики в разрезе видов экономической деятельности позволяет сформулировать следующие значимые выводы.

1. Развитие народного хозяйства Российской Федерации идет по пути постепенного снижения выбросов парниковых газов на рубль произведенного ВВП. Тем не менее качественные изменения технологий происходят недостаточно быстро, поэтому наблюдается положительный тренд абсолютной величины таких выбросов. Наибольший вклад в загрязнение атмосферы парниковыми газами в России вносит энергетика.

2. Значительная энергоемкость, наращивание потребления энергоресурсов являются мощными сдерживающими факторами для дальнейшего повышения климатической безопасности в стране. Такой вывод следует из ряда выявленных фактов. Совокупные выбросы парниковых газов в Российской Федерации перманентно растут, а их структура остается достаточно стабильной. Наибольший объем выбросов (свыше 78 %) осуществляет энергетика. Несмотря на увеличение доли более экологичного вида топлива (газа) и рост объемов использования возобновляемых источников энергии, выбросы CO₂ от энергетике имеют устойчивый положительный тренд. Невзирая на проводимую политику энергосбережения в нашей стране, показатель потребления энергии на одного занятого практически не изменялся на протяжении последних 10 лет. Поскольку на двигательную силу и технологические нужды тратится порядка 80 % энергоресурсов в производственном секторе экономики, следует изыскивать возможности для снижения энергоемкости в первую очередь техники и технологии.

3. Анализ климатоемкости—энергоемкости в разрезе видов экономической деятельности выявил, что наибольшими климатическими рисками в стране, помимо энергетики, характеризуется еще и добывающая промышленность.

4. Предложенную методику и результаты анализа природно-климатического риска видов экономической деятельности предлагается использовать в планировании, регулировании и управлении климатической безопасностью экономики страны.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования авторской методики для оценки климатической безопасности отраслей, видов экономической деятельности, народно-хозяйственных комплексов в целях их адаптации к изменяющимся климатическим условиям и управления природно-климатическими рисками. Для преодоления ограничений, повышения достоверности и значимости результатов анализа требуется увеличить статистическую обеспеченность управления климатической безопасностью, существенно расширив перечень показателей, подлежащих учету и отражению в официальной статистике. Система показателей для измерения климатоемкости и энергоемкости в соответствии с авторской методикой была предложена ранее [14].

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), научный проект № 18-010-00549 «Методология и инструментарий управления инновациями в целях минимизации климатических рисков».

Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), research project No. 18-010-00549 “Methodology and tools for managing innovations in order to minimize climate risks”.

Список литературы

1. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу. М.: Д'АРТ: Главная геофизическая обсерватория, 2011. 252 с.
2. Giles A.R., Stadig G.S., Strachan S.M., Doucette M. Adaptation to aquatic risks due to climate change in Pangnirtung, Nunavut // Arctic. 2013. V. 66, No. 2. P. 207—217.
3. Richardson K., Steffen W., Liverman D. Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions. Cambridge University Press. 2011. P. 1—517.
4. Smith E.K., Mayer A. A social trap for the climate? Collective action, trust and climate change risk perception in 35 countries // Global Environmental Change. 2018. V. 49. P. 140—153.
5. Лосев К.С. Парадоксы борьбы с глобальным потеплением // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79, № 1. С. 36—40.
6. Мишаткина Т.В., Кундас С.П. Эколого-этические аспекты глобального изменения климата в контексте социальных инициатив ЮНЕСКО // Вестник ТИСБИ. 2013. № 2. С. 1—9.
7. Мотосова Е.А., Потравный И.М. Плюсы и минусы введения углеродного налога: зарубежный опыт и позиция России по Киотскому протоколу // ЭКО. 2014. № 7 (481). С. 180—189.

8. Higgins P.A.T., Harte J. Carbon Cycle Uncertainty increases Climate Change Risks and Mitigation Challenges // *J. Climate*. 2012. V. 25, No. 21. P. 7660—7668.
9. Travis W.R., Smith J.B., Yohe G.W. Moving toward 1.5°C of warming: implications for climate adaptation strategies // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2018. V. 31. P. 146—152.
10. Butler M.P., Reed P.M., Fisher-Vanden K., Keller K., Wagener T. Inaction and Climate Stabilization Uncertainties Lead to Severe Economic Risks // *Climatic Change*. 2014. V. 127. No. 3—4. pp. 463—474.
11. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 3. С. 243—251.
12. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // *Ученые записки РГГМУ*. 2017. № 48. С. 11—32.
13. Brown I. Assessing climate change risks to the natural environment to facilitate cross-sectoral adaptation policy // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2018. V. 376. No. 2121. P. 20170297.
14. Яковлева Е.Н., Яшалова Н.Н., Рубан Д.А., Васильцов В.С. Методические подходы к оценке природно-климатических рисков в целях устойчивого развития государства // *Ученые записки РГГМУ*. 2018. № 52. С. 120—137.
15. Яковлева Е.Н. Уточнение категориального аппарата методологии управления природно-климатическими рисками в России // *Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление*. 2018. Т. 17. № 2. С. 283—309.
16. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990—2018 гг. Часть 1. М.: Росгидромет, 2020. 480 с.
17. Яковлева Е.Н., Яшалова Н.Н. История и перспективы развития платности природопользования в Российской Федерации // *Вопросы региональной экономики*. 2018. Т. 35. № 2. С. 76—86.
18. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL <https://www.gks.ru> (дата обращения 20.05.2020 г.).

Reference

1. Kattsov V.M., Porfiryev B.N. *Ocenka makroekonomicheskix posledstviy izmenenij klimata na territorii Rossijskoj Federacii na period do 2030 g. i dal'nejshuyu perspektivu*. Assessment of macroeconomic consequences of climate changes in the territory of the Russian Federation until 2030 and further prospect. Moscow: D'ARTH: Main geophysical observatory. 2011: 252 p. [In Russian].
2. Giles A.R., Stedig G.S., Strachan S.M., Doucette M. Adaptation to aquatic risks due to climate change in Pangnirtung, Nunavut. Arctic. 2013, 66: 207—217. doi: 10.14430/arctic4292
3. Richardson K., Steffen W., Liverman D. *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions*. Cambridge University Press. 2011, 1—517. doi: 10.1017/CBO9780511973444
4. Smith E.K., Mayer A. A social trap for the climate? Collective action, trust and climate change risk perception in 35 countries. *Global Environmental Change*. 2018, 49: 140—153. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2018.02.014
5. Losev K.S. Paradoxes of fight against global warming. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2009, 79 (1): 36—40. [In Russian].
6. Mishatkina T.V., Kundas S.P. The ecologist – ethical aspects of global climate change in the context of social initiatives of UNESCO. *Vestnik TISBI*. The TISBI Bulletin. 2013, 2: 1—9. [In Russian].
7. Motosova E.A., Potravnyj I.M. Pluses and minuses of introduction of a carbon tax: foreign experience and position of Russia on the Kyoto Protocol. *E'KO*. EKO. 2014, 7 (481): 180—189. [In Russian].
8. Higgins P.A.T., Harte J. Carbon Cycle Uncertainty increases Climate Change Risks and Mitigation Challenges. *Journal of Climate*. 2012, 25: 7660-7668. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00089.1
9. Travis W.R., Smith J.B., Yohe G.W. Moving toward 1.5 °C of warming: implications for climate adaptation strategies. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2018, 31: 146—152. doi: 10.1016/j.cosust.2018.03.003

10. Butler M.P., Reed P.M., Fisher-Vanden K., Keller K., Wagener T. Inaction and Climate Stabilization Uncertainties Lead to Severe Economic Risks. *Climatic Change*. 2014, 127: 463—474. doi: 10.1007/s10584-014-1283-0
11. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Naumov L.M. Moisture content of the atmosphere as a climate-forming factor. *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2018, 15 (3): 243-251. [In Russian].
12. Malinin V.N. Global Environmental Crisis and Climate. *Uchenyye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RGGMU. 2017, 48: 11-32. [In Russian].
13. Brown I. Assessing climate change risks to the natural environment to facilitate cross-sectoral adaptation policy. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2018, 376: 20170297. doi: 10.1098/rsta.2017.0297
14. Yakovleva E.N., Yashalova N.N., Ruban D.A., Vasil'czov V.S. Methodical approaches to assessment of climatic risks for sustainable development of the state. *Uchenyye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RGGMU. 2018, 52: 120—137. [In Russian].
15. Yakovleva E.N. Specification of the categorial device of methodology of management of climatic risks in Russia. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie*. The Messenger URFA. Series: Economy and management. 2018, 17 (2): 283-309. [In Russian].
16. Nacional'nyj doklad o kadastro antropogenny'x vy'brosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikov'x gazov, ne reguliruem'x Monreal'skim protokolom, za 1990—2018 gg. National inventory report on anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990—2018. M.: Roshydromet, 2020: 480 p. [In Russian].
17. Yakovleva E.N., Yashalova N.N. History and prospects of development of paid nature management in the Russian Federation. *Voprosy regional'noj ekonomiki*. Issues of the regional economy. 2018, 35 (2): 76—86. [In Russian].
18. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki: oficial'nyj sayt. Federal Service of State Statistics: official website. [Electronic Resource]. URL: <https://www.gks.ru/folder/10705> (date of appeal 20.05.2020) [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 20.05.2020
Принята к публикации 03.09.2020*

Сведения об авторах

Яковлева Елена Николаевна, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры управления и экономики Вологодского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, uenm2a@mail.ru.

Яшалова Наталья Николаевна, д-р экон. наук, доцент, заведующий кафедрой экономики и управления Череповецкого государственного университета, natalij2005@mail.ru.

Васильцов Виталий Сергеевич, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры экономики и управления Череповецкого государственного университета, 3297@rambler.ru.

Information about author

Yakovleva Elena Nikolaevna, PhD (Econ. Sci.), Associate Professor of Management and Economy, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Vologda branch.

Yashalova Natalya Nikolaevna, Grand PhD (Econ. Sci.), Associate Professor, Head of Department of Economy and Management, Cherepovets State University.

Vasil'tsov Vitaly Sergeevich, Grand PhD (Econ. Sci.), Associate Professor, Professor of Department of Economy and Management, Cherepovets State University.

УДК 556.552.2(1-924.16)

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-437-445

Особенности уровня режима озер Кольского полуострова

Е.В. Давыденко, Е.В. Гайдукова, М.С. Дрегваль

Российский государственный гидрометеорологический университет,
davydenko091@gmail.com

Приведены результаты обобщающего анализа уровня режима озер Куэтсьярви, Пул-озеро, Ловозеро, Умб-озеро, Пермус-озеро. Построены и проанализированы хронологические графики среднегодовых уровней воды исследуемых озер, выполнен анализ статистической структуры рядов, выявленные линейные тренды оценены на значимость, также приведены результаты спектрального анализа. Изучение особенностей уровня режима озер представляет интерес при долгосрочном прогнозировании, а также при расчете максимальных уровней воды различной обеспеченности.

Ключевые слова: озеро, уровень воды, спектральный анализ, цикличность, линейный тренд, стационарность рядов, многолетние колебания.

Features of the level regime of the Kola peninsula lakes

E.V. Davydenko, E.V. Gaidukova, M.S. Dregval

Russian State Hydrometeorological University

Natural lakes of the Kola Peninsula, located in the zone of excessive moistening, have been selected as the objects of study in this work. The article presents the results of a statistical analysis of the series of average annual water levels in the lakes of the Kola Peninsula. The homogeneity of most of the analysed series has been shown to be broken in terms of the average value and only in Lake Pul-ozero — in terms of dispersion. The water levels of the lakes have been established to be increasing in the long-term on the lakes Kuetsjärvi, Lovozero, Umb-ozero, Permuss-ozero. Significant trends have been revealed in the series of average annual levels of the lakes. The analysis of the chronological graphs of variation of the average annual water levels has revealed a general pattern, stating that the process of the lowest water content in lakes covers all the studied reservoirs simultaneously, while spring high-water periods are observed in different years. The series of average annual temperatures of air and precipitation have been analysed. Positive trends have been revealed in the series of annual precipitation and average annual air temperatures as well. Spectral analysis of the series of average annual water levels having been carried out, significant cycles of fluctuations have been identified. The study of the features of the level regime of lakes is of interest in long-term forecasting, as well as in calculating maximum water levels of various degrees of probability.

Keywords: lake, water level, spectral analysis, cyclicity, linear trend, stationarity of series, long-term fluctuations.

For citation: *E.V. Davydenko, E.V. Gaidukova, M.S. Dregval.* Features of the level regime of the Kola peninsula lakes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 61: 437—445. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-437-445

Введение

Кольский полуостров расположен на северо-западе Европейской части России, в Мурманской области. С трех сторон — севера, востока и юга — полуостров омывается Баренцевым и Белым морями. Полуостров входит в зону избыточного увлажнения и является озерным краем. Здесь насчитывается 107 146 озер, общая площадь зеркала которых составляет 8 195 км² или 6,3 % всей территории полуострова. Площадь водной поверхности менее 1 км² имеют 99 % озер. Подавляющее большинство озер являются сточными или проточными [1].

Изучение уровня режима озер является важной прикладной задачей. Озера — водоемы с замедленным водообменом, которые фиксируют водные ресурсы территории, и являются интегральным показателем увлажненности территории их бассейнов, а, следовательно, и изменений климата.

Климат Кольского полуострова находится под смягчающим влиянием окружающих его морей и особенно запасов тепла, приносимых северной ветвью теплого течения Гольфстрим. Одним из индикаторов изменения климата в атлантико-европейском секторе северного полушария является преобладание поступления в рассматриваемый район воздушных масс атлантического и арктического происхождения. Интенсивная циклоническая деятельность над Норвежским и Баренцевым морями создает своеобразный режим тепла и влаги на исследуемой территории [2, 3].

Цель статьи заключается в оценке уровня режима озер Кольского полуострова и в выявлении статистических особенностей в рядах уровней воды, которые могут быть следствием влияния изменяющего климата.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования в данной работе были выбраны естественные сточные озера Кольского полуострова, расположенные в зоне избыточного увлажнения (табл. 1). На четырех из пяти выбранных водоемов средние многолетние амплитуды колебаний уровней воды имеют близкие значения и варьируются от 95 (Куэтсъярви) до 110 см (Пул-озеро).

Для оценки многолетней изменчивости уровней воды на исследуемых озерах анализировались данные о средних годовых значениях уровня воды $H(t)$ и последовательности ежегодных средних значений уровней $H_i(t)$ (где $i = 1, \dots, 12$ для всех месяцев года). Также были рассмотрены наименьшие за каждый год уровни воды на данных водоемах. Для оценки климата использовались данные наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях Каневка, Ковдор, Мурманск, Янискоски (табл. 2). Эти метеостанции расположены равномерно по территории Кольского полуострова, что позволяет оценить климатические изменения по всей исследуемой области.

На рис. 1 представлена карта расположения метеостанций и гидрологических постов на озерах.

Таблица 1

Основные сведения об исследуемых озерах
Basic information about studying lakes

№ п/п	Озеро — пост	Период наблюдений	Площадь озера, км ²	Площадь водосбора, км ²	Удельный водосбор	Амплитуда, см
1	Куэтсьярви — пгт Никель	1949—2017	17	672	39,5	95
2	Пул-озеро — ст. Пулозеро	1931—2017	8,62	1130	131	110
3	Ловозеро — с. Ловозеро	1934—2017	223	3770	16,9	88
4	Умб-озеро — исток реки Умба	1931—2017	313	2380	7,60	72
5	Пермус-озеро — г. Оленегорск	1934—2017	24,4	503	20,6	73

Таблица 2

Основные сведения о метеостанциях
Basic information about meteorological stations

№ п/п	Индекс ВМО	Название метеостанции	Период наблюдений, годы		Высота станции, м БС
			температура	осадки	
1	22249	Каневка	1949—2018	1966—2018	149
2	22204	Ковдор	1952—2018	1966—2018	246
3	22113	Мурманск	1918—2018	1966—2018	57
4	22101	Янискоски	1955—2018	1970—2018	98

База исходных данных была сформирована с использованием Гидрологических ежегодников, базы данных «Основные гидрологические характеристики озер ЕТР» (ГГИ) и информационного ресурса meteo.ru.

Однородность рядов значений средних годовых уровней воды озер оценивалась по критериям Фишера и Стьюдента. Для оценки линейных трендов использовался критерий значимости выборочного коэффициента корреляции (R). Гипотеза об отсутствии тренда не опровергалась, если выполнялось условие $|R| < t_{2\alpha} \sigma_R$, при уровне значимости $2\alpha = 5\%$ [4].

Для изучения структуры временных рядов за весь период инструментальных наблюдений уровней воды исследуемых водных объектов был проведен спектральный анализ в программе *Statistica 6.0*.

Результаты

Установлено, что все ряды средних годовых уровней озер являются неоднородными. Четыре ряда из пяти (оз. Куэтсьярви, оз. Ловозеро, оз. Умб-озеро, оз. Пермус-озеро) являются неоднородными по среднему значению. Ряд уровней на озере Пулозеро неоднороден по дисперсии.

Для анализа уровня режима выбранных водоемов и выявления линейных трендов были построены хронологические графики хода средних годовых значений уровня воды (рис. 2). Качественная оценка хронологических графиков позволила выявить, что по величине среднегодового уровня на всех пяти озерах



Рис. 1. Карта расположения метеостанций и гидрологических постов на озерах.

Fig. 1. Map of the location of meteorological stations and hydrological posts on the lakes.

самым маловодным был 1960 г. Самым многоводным для озера Куэтсъярви был 1996 г., для Пермус-озера и Умб-озера — 1949 г., для Пул-озера — 1940 г., а для Ловозера — 1989 г. Но годы, в которых наблюдались наименьшие и наибольшие значения уровней воды, различны для всех озер.

Из анализа хронологических графиков хода средних годовых уровней воды выявлено, что на озерах Ловозеро, Умб-озеро и Пул-озеро в общем наблюдается высокая степень соответствия колебаний уровня воды, за исключением отдельных лет. Коэффициенты корреляции между уровнями этих озер больше 0,7. Общие закономерности флуктуаций уровня в водоемах, вероятно, связаны с поступлением воздушных масс атлантического и арктического происхождения, влиянию которых данные озера подвергаются одновременно из-за близкого расположения друг к другу.

На четырех из пяти рядов средних годовых уровней воды наблюдаются значимые тренды (табл. 3). Анализ полученных результатов показал, что в общем многолетнем разрезе наблюдается увеличение значений средних годовых уровней воды на всех водоемах, кроме озера Пул-озеро.

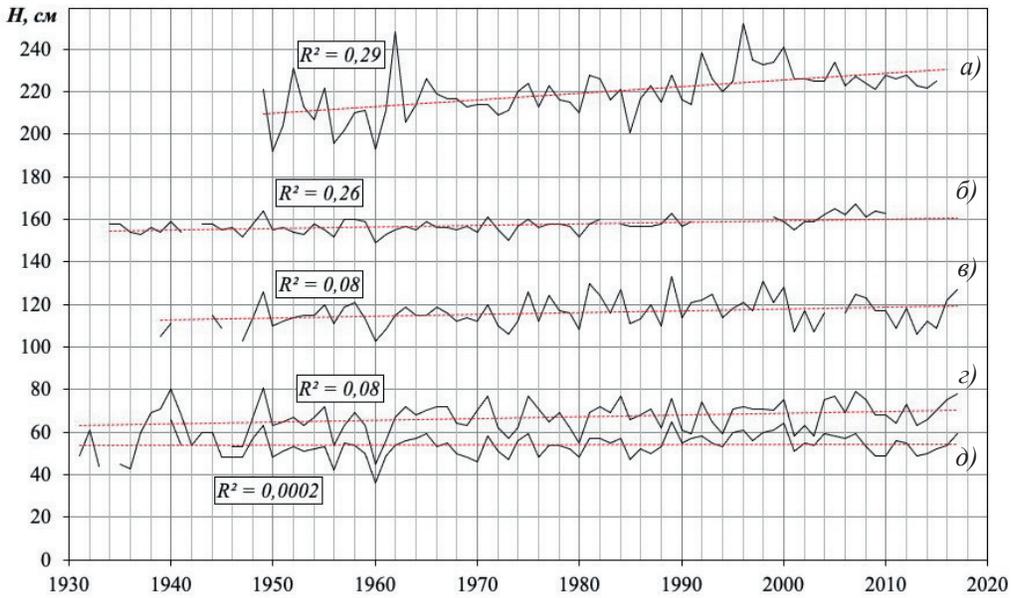


Рис. 2. Хронологические графики хода средних годовых уровней воды озер:
 а) Куэтсъярви; б) Пермус-озеро; в) Ловозеро; г) Умб-озеро; д) Пул-озеро.

Fig. 2. Chronological graphs of the course of the average annual water levels of lakes:
 а) Kuetsjärvi; б) Permус-озеро; в) Lovozero; г) Umb-озеро; д) Pul-озеро.

Таблица 3

Результаты оценки значимости
 линейных трендов в рядах средних годовых уровней воды в озерах
 Results of evaluating the significance
 of linear trends in the series of average annual water levels in lakes

№ п/п	Озеро — пост	R	R^2	σ_R	$t_{2\alpha}\sigma_R$	$H_0: R = 0$
1	Куэтсъярви — пгт Никель	0,54	0,29	0,10	0,21	Опровергается
2	Пул-озеро — ст. Пулозеро	0,01	0,0001	0,11	0,22	Не опровергается
3	Ловозеро — с. Ловозеро	0,28	0,078	0,11	0,22	Опровергается
4	Умб-озеро — исток реки Умба	0,28	0,078	0,11	0,22	Опровергается
5	Пермус-озеро — г. Оленегорск	0,51	0,26	0,10	0,21	Опровергается

Увеличение значений средних годовых уровней воды, вероятнее всего, связано с изменением климата. Ряды средних годовых температур воздуха и сумм осадков также имеют положительные тренды (рис. 3). В некоторых рядах уровней воды, температур воздуха и годовых сумм осадков есть пропуски. Это связано с отсутствием наблюдений за некоторые месяцы, что не позволяет рассчитать средние годовые значения величин. Имеющиеся пропуски находятся в различных частях ряда, что в целом позволяет допустить, что их влияние на оценку значимости тренда не существенно.

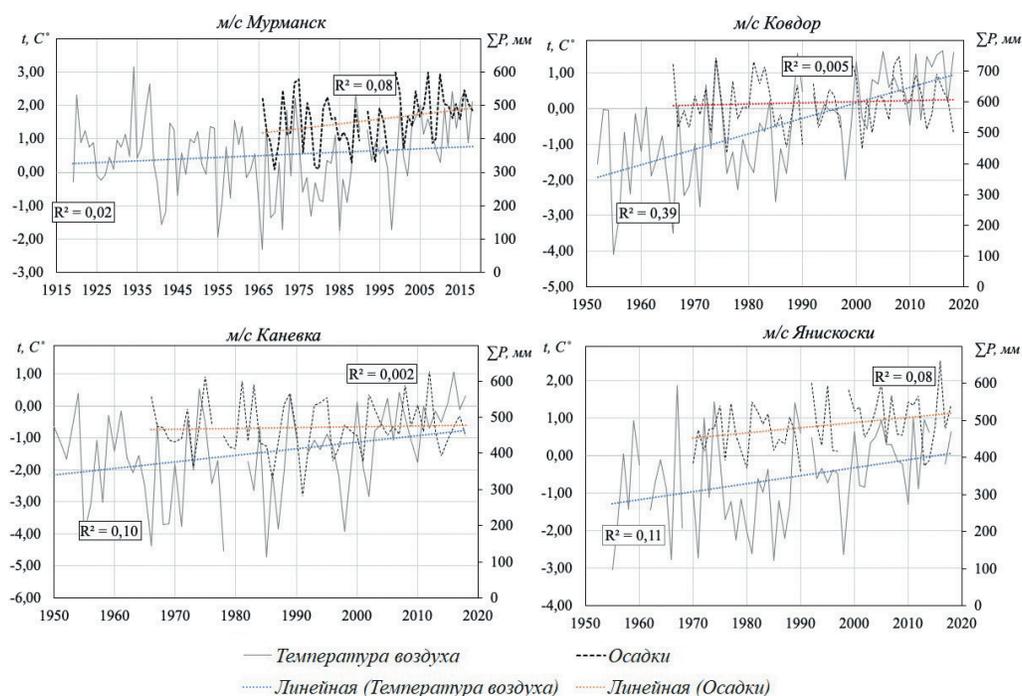


Рис. 3. Хронологические графики хода средних годовых температур воздуха и осадков.

Fig. 3. Chronological graphs of the course of average annual air temperatures and precipitation on meteostations.

Изменение климата сказываются и на наименьших уровнях исследуемых озер. Для всех рядов уровней наблюдаются положительные тренды. На озерах Куэтсьярви и Пул-озеро эти тренды значимы.

Для изучения структуры временных рядов исследуемых водоемов в программе *Statistica 6.0* был проведен спектральный анализ. Для этого все ряды были стандартизированы, также были убраны тренды. Для оценки статистической значимости полученных спектров с помощью параметра χ^2 был рассчитан и нанесен на график односторонний уровень значимости 10 %. В результате на двух озерах было установлено наличие пиков спектральной плотности $S(\omega)$, которые соответствуют различным периодам колебаний уровня воды в озере и представлены на рис. 4.

На полученных периодограммах озер Куэтсьярви, Ловозеро и Пермус-озеро значимые пики отсутствуют, т. к. имеющиеся всплески находятся ниже принятого уровня значимости 10 %. Эти колебания могут быть связаны с автоколебаниями в системе океан—атмосфера [5]. Для озера Умб-озеро выявлены квази 4-летние флуктуации уровня (частота $0,24 \text{ год}^{-1}$). В спектрах уровня озера Пул-озеро проявляются около 8-летние периоды колебаний (частота $0,12 \text{ год}^{-1}$).

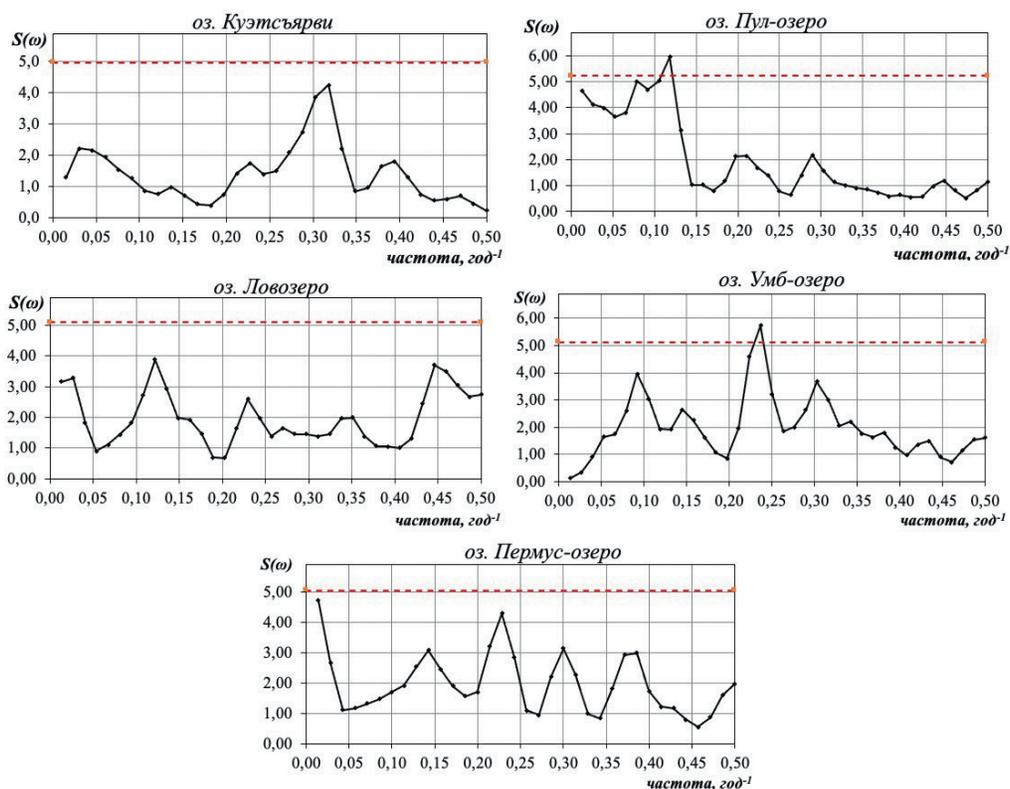


Рис. 4. Графики спектральной плотности средних годовых уровней озер (пунктирной линией обозначены уровни значимости 10 %).

Fig. 4. Graphs of the spectral density of the average annual levels of lake (the dotted line indicates the 10% significance levels).

Для описания полученных результатов спектрального анализа использовались понятия «квази» и «около», т. к. выделенные циклы имеют небольшие вариации по временному сдвигу.

Выводы

Из анализа статистической структуры рядов средних годовых уровней воды ряда озер Кольского полуострова (Куэтсьярви, Пул-озеро, Ловозеро, Умб-озеро, Пермус-озеро) следует, что однородность большей части анализируемых рядов нарушена по среднему значению и только на озере Пул-озеро — по дисперсии.

Среднегодовые уровни воды озер увеличиваются: на озерах Куэтсьярви, Ловозеро, Умб-озеро, Пермус-озеро выявлены статистически значимые тренды на повышение уровней воды.

На озерах Умб-озеро и Пул-озеро выявлены 4-х и 8-летние циклы колебаний уровней воды. На остальных озерах такие флуктуации выявлены не были, т. к. полученные пики находятся ниже принятого уровня значимости.

Все исследуемые водные объекты имеют общую закономерность, которая состоит в том, что процесс наименьшей обводненности озер охватывает все изучаемые озера одновременно, тогда как многоводье наблюдается в различные годы. Маловодный год на всех озерах пришелся на 1960 г. Показано, что на всех представленных озерах наблюдается синхронность колебаний уровня воды.

Изучение особенностей уровня режима озер представляет интерес при долгосрочном прогнозировании, а также при расчете максимальных уровней воды различной обеспеченности.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, № FSZU-2020-0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Acknowledgments

The research was carried out with the financial support of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation, № FSZU-2020-0009 “Research of physical, chemical and biological processes in the atmosphere and hydrosphere under climate change and anthropogenic impacts”.

Список литературы

1. *Мякишева Н.В.* Многокритериальная классификация озер. СПб.: Гидрометеиздат, 2009. 153 с.
2. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Северо-Атлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 2. С. 191—198.
3. *Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Семенов А.В., Анциферова А.Р., Ожигина В.Н., Богдан М.И.* Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 80—93.
4. *Сикан А.В., Малышева Н.Г., Винокуров И.О.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2014. 76 с.
5. *Филатов Н.Н.* Изменения климата Восточной Фенноскандинавии и уровня воды крупнейших озер Европы. Петрозаводск, 1997.

References

1. *Myakisheva N.V.* *Mnogokriterial'naya klassifikatsiya ozer.* Multicriteria classification of lakes. Saint Petersburg: Gidrometoizdat, 2009: 153 p. [In Russian].
2. *Malinin V.N., Gordeeva S.M.* North Atlantic oscillation and humidification of the European territory of Russia. *Obshestvo. Sreda. Razvitie.* Society. Environment. Development. 2014, 2: 191—198. [In Russian].
3. *Filatov N.N., Nazarova L.E., Georgiev A.P., Semenov A.V., Antsiferova A.R., Ozhigina V.N., Bogdan M.I.* Climate changes and variability in the European North of Russia and their impact on water objects. *Arktika: ekologiya i ekonomika.* Arctic: ecology and economy. 2012, 2 (6): 80—93. [In Russian].

4. *Sikan A.V., Malysheva N.G., Vinokurov I.O. Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii.* Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. SPb: RSHU, 2014: 76 p. [In Russian].
5. *Filatov N.N. Izmeneniya klimata Vostochnoy Fennoskandinavii i urovnya vody krupneyshikh ozer Yevropy.* Climate changes in Eastern Fennoscandia and the water level of the largest lakes in Europe. Petrozavodsk, 1997. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 28.10.2020

Принята после доработки к публикации 02.12.2020

Сведения об авторах

Давыденко Екатерина Владимировна, старший преподаватель кафедры водно-технических изысканий, Российский государственный гидрометеорологический университет, davydenko091@gmail.com.

Гайдукова Екатерина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, oderiut@mail.ru.

Дрегваль Мария Станиславовна, старший преподаватель кафедры инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, msdregval@mail.ru.

Information about authors

Davydenko Ekaterina Vladimirovna, Senior Lecturer, Department of Water Engineering Surveys, Russian State Hydrometeorological University, davydenko091@gmail.com.

Gaidukova Ekaterina Vladimirovna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, oderiut@mail.ru.

Dregval Maria Stanislavovna, Senior Lecturer, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, msdregval@mail.ru.

Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода

А.Э. Сумачев, Л.С. Банщикова

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, a-sumachev@mail.ru

За период 1950—2018 гг. по данным 5 метеостанций и 11 гидрологических постов проанализировано состояние климата и описан ледовый режим реки Печора. Проанализировано изменение уровней воды и сроков образования основных фаз ледового режима. Выявлено заметное влияние климатических изменений на ледовый режим. Анализ ледового режима по длине реки позволил выявить краткосрочные зависимости для прогнозирования высшего уровня ледохода. Полученные результаты предназначены для использования в целях разработки прогностических моделей.

Ключевые слова: ледовый режим, Печора, прогнозирование, ледоход, затор льда.

Ice regime of the Pechora river and features of forecasting the highest ice drift level

A.E. Sumachev, L.S. Bانشchikova

State Hydrological Institute, Saint Peterburg, Russia

The paper considers the change in the ice and level regime of the Pechora River at 11 hydrological stations from 1950, when the observations of ice thickness began, to 2018. The current state of the climate has been assessed according to the data of daily and monthly average air temperatures at meteorological stations located within the river catchment area. The trend towards an increase in the average air temperature for the cold period (October-April) is observed at all meteorological stations.

A statistical assessment of significance of the linear trends in all ice regime phases has shown noticeable changes in the ice regime of the Pechora River, these changes being heterogeneous. Later dates of the onset of stable ice phenomena along the river course and an increase in the period of autumn floating ice and moving sludge lead not only to the formation of ice-jam accumulations, but to the formation of a more complex heterogeneous ice structure during freeze-up as well. Earlier dates of river break-up, taking into account the probability of return of frost, increase the risks of formation of powerful ice jams.

Analysis of the ice regime along the river course has made it possible to identify short-term prognostic dependences for river sections in the area of the villages: Mutny Materik, Shchelyayur, Ust-Tsilma, Oksino, which will be used when developing modern predictive models. To assess the quality of the forecasts made, the ratio of the standard forecast error to the natural variation of the predicted value (standard deviation) has been applied. The proposed techniques have proved to be satisfactory. The impossibility of developing long-term forecasting methods is noted, which is associated with the peculiarities of the ice regime of the Pechora River.

Keywords: ice regime, Pechora, forecasting, ice drift, ice dam.

For citation: *A.E. Sumachev, L.S. Bانشchikova. Ice regime of the Pechora river and features of forecasting the highest ice drift level. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology* (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 61: 446—459. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459*

Введение

Одним из определяющих эксплуатационных факторов для рек севера Российской Федерации является зимний режим. Ошибки при определении параметров ледового режима, а именно вида ледового явления и сроков наступления различных фаз ледового режима, могут привести к негативным последствиям и возникновению чрезвычайных ситуаций, поэтому точное описание и прогнозирование элементов ледового режима позволит минимизировать риски, сведя к минимуму как косвенный, так и прямой ущерб.

Ледовый режим реки Печора в той или иной степени рассматривается во многих отечественных статьях и монографиях. К примеру, в статье [1] достаточно подробно рассмотрен ледовый режим рек арктической зоны европейской территории Российской Федерации за период 1950—2014 гг., среди прочего, в статье рассмотрено два гидрологических поста на реке Печора, относящихся к этой зоне. Прогнозированию заторных и зажорных уровней на реках России посвящена работа [2], где также уделяется внимание ледовому режиму Печоры, но только с точки зрения прогнозирования опасных ледовых явлений. Оценка изменения уровней воды за многолетний период при заторных наводнениях выполнена в статье [3]. При этом современных исследований, посвященных ледовому режиму Печоры от истока до устья, не проводилось, что определяет необходимость данной работы.

Целесообразность прогнозирования отдельных элементов зимнего режима или их совокупности необходимо определять исходя из особенностей речного участка, степени его освоенности и антропогенной нагрузки. Например, прогнозирование ледового режима рек в осенне-зимний период является необходимым на участках рек, где есть водозаборы, навигация, гидротехнические сооружения. Также прогнозирование элементов ледового режима целесообразно в местах с высокой вероятностью возникновения опасных природных явлений, связанных с неблагоприятной ледовой обстановкой. Несмотря на то, что природная вариация осенне-зимних ледовых явлений невысока, задача точного прогнозирования осложняется тем, что прогностические модели во многом зависят от точности прогноза температуры воздуха.

Существующие в настоящее время модели прогнозирования опираются на статистические данные прошлого века и не отражают реальное изменение климатических и гидрологических характеристик, а также антропогенной нагрузки, поэтому методики прогнозирования, используемые в отечественной гидрологии, требуют уточнения и актуализации.

Целью данного исследования является комплексное описание ледового режима реки Печора для установления статистических зависимостей, которые в дальнейшем могут быть использованы для разработки новых методик прогнозирования. В ходе работы были решены следующие задачи: создана база данных, включающая основные характеристики ледового режима реки Печора, актуализирующая и дополняющая информацию, помещенную в справочнике о характерных уровнях воды; количественно и качественно проанализирована межгодовая изменчивость данных характеристик, для оценки согласованности сроков

образования фаз ледового режима и интенсивности нарастания толщины льда построены корреляционные матрицы по длине реки, выявлены основные статистические зависимости.

Материалы и методы

В работе рассматривается изменение ледового и уровенного режима реки Печора по 11 гидрологическим станциям и постам (рис. 1) с 1950 (начало наблюдений за толщиной льда) по 2018 г.

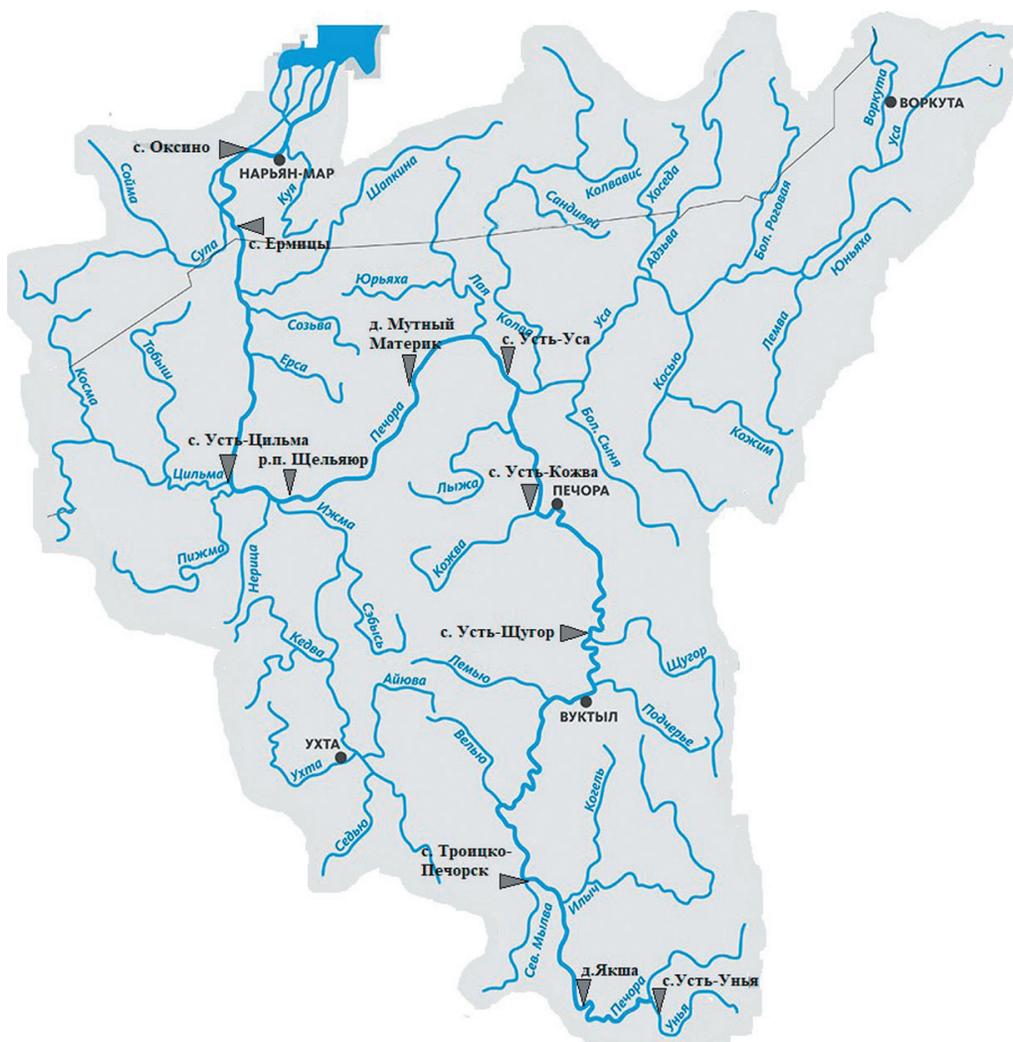


Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов на р. Печора.

Fig. 1. Layout of hydrological posts on the Pechora River.

База данных, созданная в рамках настоящего исследования, организована по следующему принципу: по данным среднесуточных и срочных уровней воды и ледовой обстановки выбраны характерные даты образования тех или иных ледовых явлений и соответствующие им уровни воды. База включает в себя следующие характеристики ледового режима за осенне-зимний период: даты образования устойчивых ледовых явлений, даты прохождения высшего уровня воды осеннего ледохода, даты установления ледостава и высшего уровня в начале ледостава, а также высшего уровня за весь период ледостава, а также даты окончания ледостава. За весенний период рассматриваются следующие характеристики: высшие предледоходные и ледоходные уровни, даты очищения реки ото льда, заторные явления. Также анализируются изменение максимальной толщины льда и повторяемость заторов и зажоров льда.

Современное состояние климата оценивается по данным среднесуточных и среднемесячных температур воздуха на метеорологических станциях, расположенных в пределах водосбора реки. По среднесуточным значениям температуры воздуха рассчитаны суммы отрицательных и положительных температур воздуха с момента устойчивого перехода температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ осенью и весной. Отдельное внимание уделено оттепелям: подсчитано количество дней в году с данным явлением и средняя температура за эти периоды, также произведен анализ характерных сумм отрицательных температур воздуха, необходимых для устойчивого образования первых ледовых явлений, ледостава, его разрушения и высшего уровня ледохода.

В работе использованы методы математической статистики и анализа: для оценки значимости линейного тренда применен метод оценки значимости коэффициента детерминации (R^2) при уровне значимости, равном 5 %, $R^2_{кр} = 0,057$; для выявления прогностических зависимостей применены регрессионные методы и искусственные нейронные сети на базе программного продукта *Statistica 12*; для оценки качества выпускаемых прогнозов применено отношение стандартной ошибки прогноза к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины ($S/\sigma_{исп}$) [4].

Результаты и их обсуждение

Климатическая характеристика исследуемого региона

Состояние климата исследуемого региона оценивается на основе среднемесячных данных о температуре воздуха за 1950—2018 гг. Нарушение стационарности рядов среднемесячной температуры воздуха отмечается с 1980 г., что определяет границы климатических периодов. Тренд к повышению средней температуры воздуха за холодный сезон года (октябрь—апрель) наблюдается на всех метеостанциях Северного края, включая метеостанции, расположенные в пределах водосбора реки Печора (табл. 1).

Сравнительно с периодом 1950—1980 гг. увеличение средней за холодный сезон температуры воздуха составило $0,7\text{—}1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. В Нарьян-Маре и реке на других метеорологических станциях отрицательные температуры могут сохраняться до

второй половины, в редких случаях до третьей половины мая, поэтому подекадно были проанализированы тренды за данный период по всем метеорологическим станциям исследуемого региона. Несмотря на заметное повышение температуры воздуха, выявлено отсутствие статистически значимых трендов за 1—2 декаду мая, статистически значимым оказалось лишь повышение температуры воздуха в последнюю декаду мая, что не может оказывать влияния на ледовый режим реки Печора.

Таблица 1

Изменение среднемесячной температуры воздуха за октябрь—апрель на метеостанциях, расположенных в пределах водосбора р. Печора

Change in mean monthly air temperature for October—April at meteorological stations located within the catchment of the Pechora River

Пункт	Характеристика	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Троицко-Печорское	Т, °С	1950—2018	-0,6	-9	-14,4	-17,7	-15,7	-7,8	0
		1950—1980	-1,4	-9	-14,4	-18,4	-16,4	-8,9	-0,2
		1981—2018	0	-9,1	-14,3	-17,1	-15,1	-6,8	0,1
	Разница, °С	1,4	-0,1	0,1	1,3	1,3	2,1	0,3	
	R^2	0,017	0,012	0,001	0,004	0,017	0,102	0,003	
	Значимость	-	-	-	-	-	+	-	
Усть-Цильма	Т, °С	1950—2018	-0,8	-9	-13,6	-17,4	-15,6	-8,9	-2,3
		1950—1980	-1,7	-9,1	-13,6	-17,8	-16,3	-10,3	-2,8
		1981—2018	-0,1	-8,9	-13,7	-17	-15	-7,7	-1,9
	Разница, °С	1,6	0,2	-0,1	0,8	1,3	2,6	0,8	
	R^2	0,044	0,010	0,000	0,002	0,010	0,102	0,020	
	Значимость	-	-	-	-	-	+	-	
Усть-Уса	Т, °С	1950—2018	-2,1	-10,6	-15,4	-18,6	-17,1	-10,4	-4
		1950—1980	-2,8	-10,7	-15,1	-19	-17,3	-11,7	-4,1
		1981—2018	-1,5	-10,6	-15,6	-18,2	-16,8	-9,3	-4
	Разница, °С	1,3	0,1	-0,4	0,8	0,5	2,5	0,1	
	R^2	0,040	0,008	0,000	0,000	0,004	0,096	0,008	
	Значимость	-	-	-	-	-	+	-	
Печора	Т, °С	1950—2018	-1,3	-10,3	-15,6	-19,1	-17,3	-9,8	-2,9
		1950—1980	-2,4	-10,2	-15,4	-19,4	-17,8	-11,4	-3,3
		1981—2018	-0,3	-10,1	-15,4	-18,2	-16,3	-8,2	-2,5
	Разница, °С	2,1	0,1	0,1	1,2	1,5	3,3	0,8	
	R^2	0,084	0,020	0,005	0,002	0,012	0,102	0,029	
	Значимость	+	-	-	-	-	+	-	
Нарьян-Мар	Т, °С	1950—2018	-1,5	-9,5	-13,5	-17,5	-17	-12,1	-6,4
		1950—1980	-2,5	-9,9	-13,6	-17,9	-17,8	-13,8	-7
		1981—2018	-0,6	-9,1	-13,5	-17,2	-16,3	-10,8	-5,9
	Разница, °С	1,9	0,8	0,1	0,8	1,6	3,0	1,2	
	R^2	0,068	0,053	0,000	0,090	0,040	0,010	0,002	
	Значимость	+	-	-	+	-	-	-	

Выявлено, что количество оттепелей, а также их мощность, оцененная как сумма положительных температур, с течением времени не увеличивается и остается стационарной случайной величиной. Потепление же климата в зимний период может быть объяснено статистически значимым повышением отрицательных значений температуры воздуха: отрицательные суммы, накопленные на конец зимнего периода значительно увеличились, что характеризуется трендом с коэффициентом детерминации, равным 0,078.

Ледовый режим реки Печора

Печора — крупная водная артерия, которая характеризуется высокими скоростями течения и относится к третьему типу замерзания. Для рек третьего типа характерно ледообразование по всей глубине потока. Замерзание сопровождается образованием значительного количества шуги и движением ее вниз по течению. Ледяной покров образуется при остановке, сплочении и смерзании шуги, что влияет на весь цикл ледовых явлений, вплоть до полного чищения ото льда. Ниже более подробно рассмотрены особенности каждой фазы.

Ледовый режим в период замерзания

Начало образования первичных ледовых явлений, как правило, заберегов, начинается с устойчивым переходом температуры воздуха через 0 °С и в целом подчиняется широтному закону. Устойчивые ледовые явления наблюдаются при достижении суммы отрицательных температур в среднем –14 °С.

На графике (рис. 2) видно, что в настоящее время появление льда сместилось на более поздние сроки — третью декаду октября. До 1980 г. можно было выделить два участка реки: от с. Усть-Унья до с. Усть-Кожва, и участок реки от с. Усть-Уса до с. Оксина. Появление первых ледовых явлений приходилось на третью декаду октября на первом участке и на вторую декаду октября — на втором. В настоящее время, из-за неравномерного смещения сроков на более поздние, появление первых ледовых явлений отмечается в третьей декаде октября по всей длине реки. Основной причиной смещения сроков образования первичных ледовых явлений на более поздние является повышение температуры воздуха по всей территории Северного края.

При оценке трендов уровней воды на дату появления устойчивых ледовых явлений выявлено, что однозначного положительного или отрицательного тренда по длине реки Печора нет. Положительный тренд выявлен на участке от с. Усть-Унья до с. Усть-Щугор, ниже по течению тренд отрицательный, практически на всем течении реки до с. Ермицы. Это может быть объяснено не только морфологией русла, но и особенностями физико-географического положения. Анализ данных об изменении дат и уровней воды, приуроченных к устойчивому образованию ледовых явлений, статистически значимых трендов не выявил. Статистическая связь между постами достаточно высокая как для дат, так и для уровней воды и характеризуется коэффициентом корреляции 0,78 и 0,63 соответственно.

По всему течению реки первичные ледовые явления выражаются как сочетания заберегов, редкого и густого шугохода. Эта особенность характерна для многих больших рек. Во время ледохода как правило, наблюдается максимальный за переходный период уровень воды, что объясняется режимом уменьшением

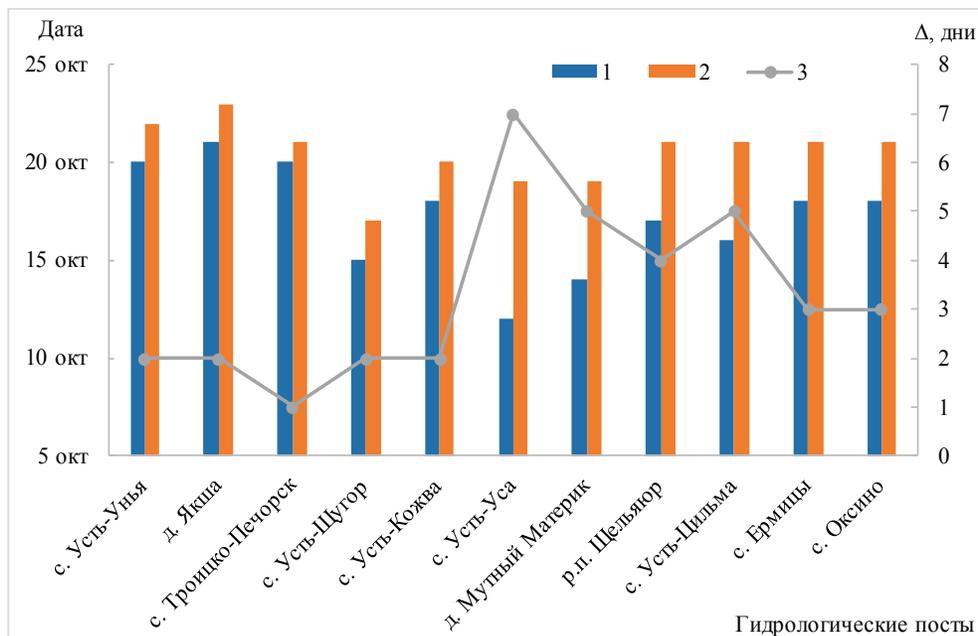


Рис. 2. График сроков появления ледовых явлений на различных постах р. Печоры за период 1950—1980 гг. (1) и 1981—2018 гг. (2) и разница (Δ) между ними (3).

Fig. 2. The time schedule for the appearance of ice phenomena at various posts of the river Pechora for the period 1950—1980. (1) and 1981—2018 (2) and the difference (Δ) between them (3).

пропускной способности русла. Для реки Печора характерно увеличение повторяемости осенних ледоходов от истока, например, для Усть-Уньи повторяемость образования осенних ледоходов невысока и составляет 41 %; продвигаясь вниз по течению, повторяемость осеннего ледохода увеличивается и на участке от с. Усть-Кожва до с. Усть-Цильма составляет 100 %, к устью же происходит резкое снижение данной величины до 35 %. Средняя продолжительность осеннего ледохода составляет 7—10 дней в верхнем течении, в среднем — 13 дней, на участке от с. Ермицы до устья уменьшается до 4 дней. Максимальная продолжительность ледохода может достигать 30 дней. Уровненный режим осеннего ледохода для большинства постов имеет положительный тренд за многолетний период, и только на участке реки Печора р.п. Щельяюр — с. Усть-Цильма — отрицательный. Следует также отметить, что наблюдаемый в 2006—2007 г. в верхнем течении, а в 2013—2014 г. в среднем течении, высший уровень ледохода был максимальным за многолетний период.

Ледовый режим в период ледостава

От образования первых ледовых явлений до смерзания отдельных льдин и шуги, и образования устойчивого — длительностью не менее 10 дней — ледостава может пройти значительное время, вплоть до двух месяцев. В среднем это

10—12 дней в нижнем и верхнем течении, в среднем течении около 20 дней, сумма отрицательных температур при этом не должна быть выше $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$, в целом же, ее точное значение зависит от площади водосбора и уровня воды в период замерзания. В нижнем и среднем течении длительность переходного периода стационарна, в то время как в верхнем течении она увеличивается в среднем на 3 дня, что является статистически значимым. На участке Усть-Уса—Усть-Кожва наблюдается обратная тенденция, связанная, в том числе с падением уровней воды за переходный период. Согласованность сроков замерзания по длине реки высока и характеризуется средним коэффициентом корреляции, равным 0,81.

Особенностью образования ледостава на реке Печора является значительное повышение уровня воды в первые 8—11 дней до отметок, близких или, например, в верховьях, равных максимальному уровню воды за ледоставный период. Данный уровень является характеристикой зашугованности и уменьшения пропускной способности русла за счет образования ледостава. В случае, если данный уровень сформирован зазорными явлениями, то возрастает его влияние на формирование максимального уровня весеннего ледохода.

По данным Каталога заторных и зазорных участков рек СССР на реке Печора существует 12 зазорных участков. Анализ данных ледовой обстановки и характерных уровней за многолетний период показал, что повторяемость этих явлений для всех постов практически не изменилась, зазорные скопления наблюдаются практически ежегодно — повторяемость порядка 90 % и только в устьевом участке у с. Оксина около 50 %. Мощные зазоры характерны как для самой Печоры, так и для ее притоков Ижмы, Сулы, Цильмы. Зазорные подъемы уровней воды могут достигать 3,5—5 м [5].

Для Печоры характерно образование краткосрочных зазоров льда, что выражается в зависимости между уровнем, приходящимся на первый день ледостава и максимальным ($R = 0,95$) и отсутствием значительного влияния зазоров на формирование весеннего ледохода, поэтому связь между высшим уровнем в начале ледостава и высшим уровнем весеннего ледохода выражена менее четко, что осложняет прогнозирование весенних уровней воды с большой заблаговременностью (τ). Анализ данных за многолетний период не выявил каких-либо статистически значимых трендов, характерных для данных уровней воды.

С первого дня образования устойчивого ледостава начинается интенсивный процесс нарастания ледового покрова. Максимальная толщина льда на всех пунктах наблюдения, как правило, отмечается только в марте—апреле. Распределение максимальных толщин льда подчиняется широтному закону, увеличиваясь с юга на север.

Анализ данных позволил выявить наличие статистически значимых трендов к снижению максимальной толщины льда на большинстве пунктов наблюдений, уменьшение максимальной толщины льда при этом составило до 15 см (рис. 3), положительных трендов выявлено не было. Анализ статистической взаимосвязанности в данных максимальных толщин льда по длине реки показал отсутствие какой-либо значимой связи ($R = 0,21$), что свидетельствует о том, что на нарастание льда большее влияние оказывают локальные факторы.

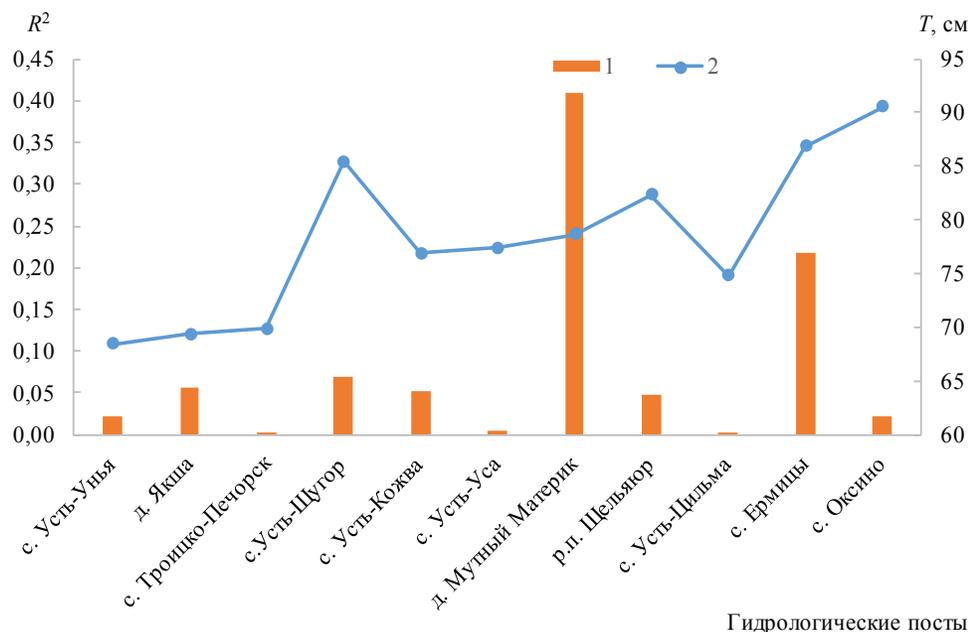


Рис. 3. Изменение максимальной толщины льда (1) и средняя за многолетний период толщина льда по длине р. Печоры (2).

Fig. 3. Change in maximum ice thickness (1) and average ice thickness over a long-term period along the length of the river Pechora (2).

Высший уровень за весь период ледостава, как правило, наблюдается в конце ледостава, лишь в истоках (с. Усть-Унья) в 40 % случаев он может наблюдаться в начале ледостава. Связь между высшим уровнем в начале и за весь ледостав различна, к примеру, на участке реки в селе Оксино данная связь отсутствует ($R = 0,11$), а на участке в с. Ермицы и р.п. Щельяюр коэффициент корреляции достигает 0,48. При этом отмечается статистически значимое падение высших за ледостав уровней воды, в среднем падение уровней воды составило 44 см.

Ледовый режим в период вскрытия

С переходом температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в область положительных значений начинается процесс деградации ледового покрова и его постепенное разрушение, начинающееся с подвижек и краин. Последний день устойчивого ледостава приходится на конец апреля — первую половину мая, в зависимости от широты местности (рис. 4). В редких случаях при раннем вскрытии притоков и вышележащих участков реки возможны ситуации вскрытия конкретного участка реки на фоне отрицательных температур воздуха.

Таким образом, средняя продолжительность ледоставного периода составляет 183 дня. Продолжительность ледостава за счет смещения сроков замерзания

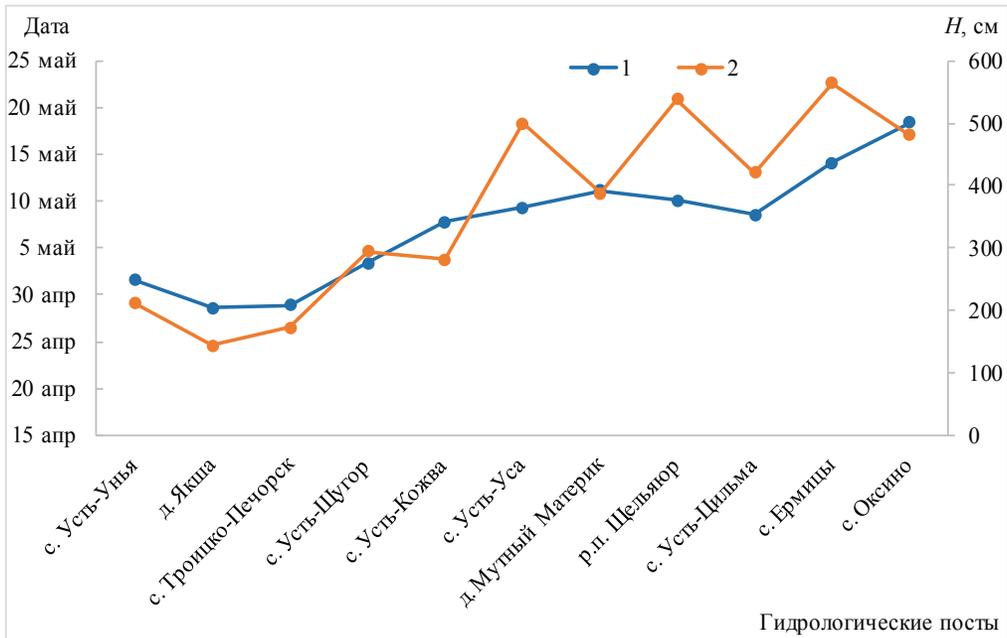


Рис. 4. Изменение дат (1) и уровней воды (2), приуроченных к началу разрушения ледового покрова на различных постах р. Печора.

Fig. 4. Changes in dates (1) and water levels (2), timed to the beginning of the destruction of the ice cover at various stations of the river Pechora.

и вскрытия уменьшается во всех пунктах наблюдений, но наибольшее ее уменьшение отмечается в среднем течении реки; в истоке и устье эти изменения минимальны, в связи с гораздо большим влиянием локальных факторов. При этом можно отметить тесную статистическую связь между датой первого дня ледостава и длительностью ледостава, характеризуемую средним коэффициентом корреляции, равным 0,76, что может быть использовано для долгосрочного прогнозирования. Период от начала деградации ледового покрова до его разрушения и начала весеннего ледохода занимает всего несколько дней. Как правило, за этот период уровни значительно возрастают, в отдельные годы наоборот, может наблюдаться их снижение, что приводит к достаточно низким уровням воды при ледоходе. После того, как уровни воды достигли критического значения, при которых ледовый покров уже более не в состоянии сдерживать прибывающую воду начинается ледоход. Высший ледоходный уровень воды, в зависимости от погодных условий и характера вскрытия наблюдается либо в середине ледохода, либо в конце. В устьях крупных притоков нередки случаи, когда наблюдаемый максимум отмечается при вторичном ледоходе, в начале ледохода максимальные уровни формируются редко и, как правило, связаны с заторами льда.

По данным каталога [6] на реке Печора имеется 15 заторных участков. При анализе ледовой обстановки и уреченных характеристик за многолетний период выявлено уменьшение повторяемости и мощности этих явлений. Так для с. Усть-Унья повторяемость составляет 23 %, д. Якша — 39 %, на участке у с. Троицко-Печорск и у с. Усть-Цильма повторяемость практически не изменилась (39 % и 35 % соответственно), с. Усть-Щугор — 39 %, с. Усть-Кожва — 61 % (наибольшая повторяемость заторов на всем течении реки), с. Усть-Уса — 17 %, д. Мутный Материк — 31 %, в нижнем течении повторяемость составляет для с. Ермицы — 47 %, с. Оксина — 20 %.

Сроки очищения реки от льда различаются как вследствие широтной зависимости, так и по причине влияния крупных притоков, которые могут вскрываться значительно позже основной реки, формируя вторичный ледоход, из-за чего сроки полного очищения реки ото льда могут значительно увеличиваться. К примеру, река Уса формирует вторичный ледоход на реке Печора, увеличивая сроки очищения реки ото льда на основной реке на 2 дня по сравнению с участком реки вблизи д. Мутный Материк. В среднем, очищение реки ото льда происходит с 10 мая в верхнем течении по 24 мая в нижнем, исключением является участок реки близ д. Усть-Уса, где очищение реки ото льда происходит примерно 27 мая. Наблюдаемые тренды к смещению дат на более ранние и к снижению уровней воды являются статистически незначимыми. Также можно отметить хорошую статистическую связанность дат и уровней воды.

Особенности прогнозирования высшего уровня ледохода

Особенности прогнозирования высшего уровня ледохода для реки Печора заключаются в отсутствии статистической связи между гидрологическими параметрами в пределах пункта наблюдений. То есть связь между высшим уровнем в начале ледостава, максимальной толщиной льда и даже высшим предледоходным уровнем выражена крайне слабо. Это предопределяет принципиальную невозможность разработки долгосрочных методик прогнозирования, а также использование инерционных прогнозов. Таким образом, на реке Печора возможно создание лишь краткосрочных методик прогнозирования со средней заблаговременностью не более 8 дней, основанных на соответствующих уровнях воды. Критерием качества моделей должно выступать отношение стандартной ошибки прогноза к природной вариации прогнозируемой величины ($S/\sigma_{\text{Исп}}$), а не к среднему изменению за период заблаговременности ($S/\sigma_{\text{АН}}$), т. к. критерий $S/\sigma_{\text{Исп}}$ оказывается несколько строже. Например, по данным работы [2] для с. Ермицы критерий $S/\sigma_{\text{Исп}}$ почти в 2 раза больше.

Таким образом, анализ данных показал, что связь между предледоходными высшими уровнями воды и ледоходными уровнями неоднозначна и не может быть использована в качестве основного предиктора при прогнозировании. Только на посту Оксина коэффициент корреляции между ними достигает 0,6. Интенсивность нарастания уровня еще меньше связана с высшим уровнем ледохода и однозначно не может быть использована при его прогнозировании. Единственными доступными предикторами при прогнозировании высших ледоходных уровней на реке Печора остаются высшие ледоходные уровни воды постов, расположенных

выше по течению, и постов на реке Цильма. Использование в качестве предикторов при прогнозировании высших уровней воды на реке Ижма, как было предложено в работе [2], невозможно в силу сооружения дамбы и, как следствие, полному отсутствию связи после 1980 г., использование высших ледоходных уровней воды по другим притоком исключено в силу более позднего их формирования.

В рамках данной работы методом регрессионного анализа выявлены прогностические зависимости для д. Мутный Материк в зависимости от высшего уровня ледохода в р.п. Щельяюр ($\tau_{\text{cp}} = 2$ дня, $S/\sigma_{\text{Hcp}} = 0,60$), для р.п. Щельяюр в зависимости от высшего уровня ледохода на реке Ижме в с. Трусово и высшего предледоходного уровня воды на посту Щельяюр ($\tau_{\text{cp}} = 6$ дней, $S/\sigma_{\text{Hcp}} = 0,70$), для с. Усть-Цильма в зависимости от высшего уровня ледохода на реке Ижме в с. Трусово и разницы в толщинах льда в с. Усть-Цильма и р.п. Щельяюр ($\tau_{\text{cp}} = 8$ дней, $S/\sigma_{\text{Hcp}} = 0,71$) и с. Оксино в зависимости от высшего уровня ледохода в с. Ермицы и высшего предледоходного уровня воды на посту в с. Оксино ($\tau_{\text{cp}} = 4$ дня, $S/\sigma_{\text{Hcp}} = 0,52$). Качество выпускаемых прогнозов может быть улучшено при использовании методов обучения искусственных нейронных сетей. Например, использование программного продукта *Statistica 12* и алгоритма обучения нейронных сетей позволяет в подавляющем большинстве случаев улучшить качество выпускаемых прогнозов, к примеру, для с. Оксино отношение ошибки прогноза к природной вариации при использовании нейронной сети *MLP 2-8-1* составило 0,33.

Заключение

В работе рассмотрен ледовый режим реки Печора за период 1950—2018 гг. Показана его неоднородность по длине реки. Можно утверждать, что из-за впадения крупных притоков и смены направления течения основной реки изменяется и ледовый режим, при этом разделение происходит по посту Усть-Кожва. Статистическая оценка значимости линейных трендов всех фаз ледового режима показала заметные неоднородные изменения в ледовом режиме на реке Печора.

Более поздние сроки наступления устойчивых ледовых явлений по длине реки и увеличение периода осеннего ледохода и шугохода приводят к формированию не только зажорных скоплений, но и к образованию более сложной неоднородной структуры льда при ледоставе. Продолжительное время наблюдается несплошной ледостав, участки с торосами, полыньи и промоины. Уменьшение периода ледостава приводит к уменьшению периода нарастания льда. Более ранние сроки вскрытия реки, с учетом вероятности возврата холодов, повышают риски формирования мощных заторов льда.

В то же время уровенный режим не претерпел значительных изменений. Повторяемость опасных природных явлений также осталась на прежнем уровне, что согласуется с данными анализа, полученными по другим рекам исследуемого региона, и свидетельствует о том, что важнейшим фактором образования опасных природных явлений являются гидроморфологические характеристики конкретного участка реки, а климатические факторы являются второстепенными.

В результате анализа ледового режима по длине реки установлены краткосрочные прогностические зависимости, которые будут использованы при разработке современных прогностических моделей.

Научная новизна работы заключается в использовании современных, более обширных данных по реке Печора, которые позволили комплексно описать и актуализировать информацию по ледовому режиму в период замерзания, ледостава и вскрытия, а также выявить прогностические зависимости. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных зависимостей для разработки прогностических методик.

Список литературы

1. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 41—49.
2. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.: ГГИ, ГГИ, 2015. 240 с.
3. Банищикова Л.С. Выделение зон затопления при заторных наводнениях (на примере р. Печоры) // Сборник работ по гидрологии. № 28. 2011. С. 4—13.
4. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. СПб.: РГГМУ, 2013. 408 с.
5. Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Бабурин В.Л., Банищикова Л.С., Горошкова Н.И., Завадский А.С., Крыленко И.Н., Савельев К.Л., Козлов К.Д., Бузина Л.Ф. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: монография. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2015. 347 с.
6. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Европейская часть. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 260 с.

References

1. Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N., Shirocova V.A. Ice regime and dangerous hydrological phenomena on rivers of the arctic zone of European Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. Moscow State University Bulletin. 2016, 5(6): 41—49. [In Russian].
2. Buzin V.A. Zazhory i Zatory l'da na rekakh Rossii. Ice jam and ice dam on the Russian rivers. St. Petersburg: SHI, 2015: 240 p. [In Russian].
3. Banshikova L.S. Allocation of flooding zones in case of jam floods (for example, the Pechora river). *Sbornik rabot po gidrologii*. Collection of works on hydrology. 2011, 28: 4—13. [In Russian].
4. Malinin V.N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii*. Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. St.-Petersburg: RSHU, 2013: 408 p. [In Russian].
5. Kozlov D.V., Buzin V.A., Frolova N.L., Agafonova S.A., Baburin V.L., Banshchikova L.S., Goroshkova N.I., Zavadskiy A.S., Krylenko I.N., Savel'yev K.L., Kozlov K.D., Buzina L.F. *Opasnyye ledovyye yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh Rossii*. Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia. Moscow: RSAU-MTAA. 2015: 347 p. [In Russian].
6. *Katalog zatornih i zajornih uchastkov rek SSSR. T. 1. Evropeiskaya chast*. Catalogue of ice-dammed and ice-jammed areas of the USSR rivers. V. 1. European part of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 260 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.08.2020.

Принята после доработки к публикации 16.11.2020.

Сведения об авторах

Сумачев Александр Эдуардович, аспирант, аспирантура Государственного гидрологического института, a-sumachev@mail.ru.

Банщикова Любовь Святославовна, канд. геогр. наук, зав. ОНТИ, старший научный сотрудник, balju@rambler.ru.

Information about authors

Sumachev Aleksandr Eduardovich, Postgraduate student, Postgraduate department of Federal State Budgetary Institution "State Hydrological Institute".

Banshchikova Liubov Svyatoslavovna, PhD (Geogr. Sci.), chief of the Department of scientific and technical information, Senior Research.

**Особенности лимнологических параметров системы
«Лещевое озеро — Лещевый залив»
в период максимального прогрева воды
(Валаамский архипелаг, Ладожское озеро)**

*А.Н. Чернышев, В.О. Сергеева, А.К. Котова, С.Н. Никитина,
А.В. Бабин, Е.Ю. Воякина, А.Б. Степанова*

Российский государственный гидрометеорологический университет,
chernyshev.alexander2015@yandex.ru

Представлены данные комплексного экологического исследования системы «Лещевое озеро — Лещевый залив», полученные при прохождении производственной практики студентов на базе Учебно-научной станции РГГМУ на о. Валаам в июле 2018 г. Основное внимание уделено анализу пространственного распределения лимнологических параметров. Для параметров цветности, перманганатной окисляемости и электропроводности обнаружена существенная пространственная изменчивость. По сравнению с малыми водоемами северного побережья Ладожского озера озеро Лещевое отличается повышенными значениями параметров, характеризующих содержание органического вещества. Результаты работы могут быть использованы при планировании и проведении природоохранных мероприятий в ООПТ «Валаамский архипелаг», а также при разработке мелиоративных работ Валаамским монастырем на водосборной площади озера Лещевое.

Ключевые слова: Ладожское озеро, Валаамский архипелаг, малые озера, лимнологические параметры.

**Limnological parameters features of “Lake Leschovoye —
Leschovy bay” system in maximum water heating period
(Valaam archipelago, lake Ladoga)**

*A.N. Chernyshev, V.O. Sergeeva, A.K. Kotova, S.N. Nikitina,
A.V. Babin, E.Ju. Voyakina, A.B. Stepanova*

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The results of a complex ecological study of “Lake Leschovoye — Leschovy Bay” water system are presented. Data were obtained during ecology students’ field practice on the Russian State Hydrometeorological University Scientific and Educational Station in July 2018, located on Valaam Island. The ranges of limnological parameters, such as water temperature, water transparency, water colour index, turbidity, conductivity, pH, dissolved oxygen concentration, dissolved carbon dioxide concentration, and organic matter concentration have been analysed, the characteristics of phytoplankton and zooplankton community being given as well. Water samples for hydrochemical analysis were taken both from the surface and bottom water layers. All parameters were analysed by commonly used methods.

For water colour index, organic matter concentration and conductivity, the significant spatial variability was observed. The highest values of water colour index in the studied water system were observed in Lake Leschovoye, being more than 2 times higher than in Leschovy Bay. Organic matter concentration was also the highest in Lake Leschovoye, being 1,5 times higher than in Leschovy Bay. The statistical analysis of hydrochemical parameters spatial variability divided the lake system into two big and contrasting parts:

Lake Leschovoye and Leschovi Bay. Significant relation between a number of hydrochemical parameters was observed. In Lake Leschovoye there were high correlations between conductivity and dissolved carbon dioxide concentration, as well as between conductivity and dissolved oxygen concentration. The phytoplankton community was mostly presented with two large taxa: *Cyanoprokaryota* and *Raphidophyta*, dominating with 75% of total abundance. *Raphidophyta* dominated by biomass, mostly due to one species — *Gonyostomum semen*, its share in total biomass being 95%. Zooplankton community was dominated by *Cyclopoida*, abundance and biomass of which being up to 3 times higher than in other taxa. Based on the values of the limnological parameters Leschovoye Lake can be classified as mesohumic lake with high organic matter concentration and low water transparency.

Lake Leschovoye, compared with water bodies of Lake Ladoga north shore, differentiated by high values of parameters characterizing organic matter concentration. This is caused by geological features of Valaam Archipelago and high watershed swampiness. Organic substance runoff from the arable meadows within the watershed also makes a significant contribution to the lake features.

Keywords: Lake Ladoga, Valaam Archipelago, small lakes, limnological parameters.

For citation: *A.N. Chernyshev, V.O. Sergeeva, A.K. Kotova, S.N. Nikitina, A.V. Babin, E.Ju. Voyakina, A.B. Stepanova. Limnological parameters features of “Lake Leschovoye — Leschovi bay” system in maximum water heating period (Valaam archipelago, lake Ladoga). Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 61: 460—479. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-460-479*

Введение

Внутриводоемные процессы являются сложным комплексом взаимосвязанных и изменяющихся параметров. Для понимания их влияния как друг на друга, так и на экосистему водоема, необходимо проведение комплексных лимнологических исследований. Такие исследования базируются на концепции наличия тесных связей в системе озеро—водосбор. Они включают в себя изучение различных параметров этой системы. Это позволяет оценить как пространственно-временную динамику параметров водоема, так и степень воздействия различных внешних факторов.

Озерность Республики Карелия составляет 12 %, большинство из озер относится к малым лесным [1]. Некоторые из этих водоемов довольно хорошо изучены, что позволяет сопоставить полученные натурные данные с уже имеющимися [2]. Однако, анализ пространственного распределения лимнологических параметров для малых озер встречается довольно редко. Несмотря на небольшую площадь, в пределах таких водоемов могут выделяться зоны, довольно сильно отличающиеся по тем или иным характеристикам. Особый интерес представляют малые озера Валаамского архипелага, которые, будучи расположенными на довольно небольшой площади (36 км²), значительно различаются по лимнологическим параметрам [3]. Ряд водоемов, в том числе озеро Лещевое, через протоки связаны с заливами Ладожского озера, расположенном на 3—5 м ниже относительно них. В связи с этим представляет интерес изучение этих водных объектов в системе для оценки их влияния друг на друга, а также пространственной изменчивости их параметров.

Валаамский архипелаг находится в северной холодноводной части Ладожского озера, относящейся к южнобореальной зоне [4]. Территория архипелага представляет собой интрузивное тело, сложенное габбро-диабазами, ферро-габбро и моноцитами, на которых образуются буроземные, болотно-подзолистые и

болотные почвы [5, 6]. Архипелаг входит в состав ООПТ регионального значения республики Карелия. Для большинства озер антропогенное воздействие отмечено лишь локально и только в последние годы, что позволяет исследовать естественную динамику озерных экосистем, существенно не нарушенных влиянием человека.

Исследование системы водных объектов «Лещевое озеро — протока — Лещевый залив» проводилось на базе Учебно-научной станции РГГМУ на о. Валаам в рамках производственной практики студентов-экологов [7]. Цель работы: оценить пространственную изменчивость ряда лимнологических параметров водной системы «Лещевое озеро — Лещевый залив» в июле 2018 г.

Объект исследования

Исследуемая система расположена в южной части о. Валаам. На ее водосборной площади представлены преимущественно лесные и луговые сообщества. В рамках исследования были выделены 4 группы лесных ассоциаций: сосняки лишайниковые, ельники сфагновые, ельники кислично-зеленомошные и ельники чернично-зеленомошные. Среди луговой растительности выделены две группы: луга после проведения мелиораций (2016 г.) и сельскохозяйственные угодья для выпаса скота.

Озеро Лещевое с площадью зеркала в 0,24 км² и значительной водосборной площадью (2,45 км²) — одно из крупнейших водоемов архипелага [3]. Колебания уровня воды в Ладожском озере оказывают значительное влияние на водообмен системы. Так, в годы с низким уровнем воды в Ладоге озеро Лещевое обычно изолировано от Лещевого залива, а протоки полностью пересыхают. Наиболее явно это наблюдалось в 2003 г. и в 2010 г. В 2018 г. был зафиксирован повышенный уровень воды в Ладоге, что вероятно привело к подпору вытекающих из Лещевого озера вод. В связи с этим площадь исследуемого водоема увеличилась в 1,5 раза (рис. 1).

Подобного увеличения площади не наблюдалось последние 20 лет. Затоплению подверглись расположенные на водосборе луга, что способствовало поступлению соединений фосфора и гумусовых веществ с затопленных земель [7, 8].

Для озера характерно активное развитие макрофитов, занимающих до 15 % площади озера. Наибольшая степень зарастания наблюдается в мелководных заливах в связи с большей площадью литорали.

Бентос водоема по сравнению с другими озерами архипелага отличается высоким видовым богатством и показателями обилия. Донная фауна представлена червями (олигохеты, пиявки), личинками насекомых (мокрецы, хаоборус, хирономиды) и моллюсками. Наибольшим видовым разнообразием отличались хирономиды. Другие группы представлены только одним видом [9].

Материалы и методы

Исследование проводилось в период с 3 июля по 10 июля 2018 г. на 31 станции, распределенных равномерно по всей исследуемой системе. В сеть станций

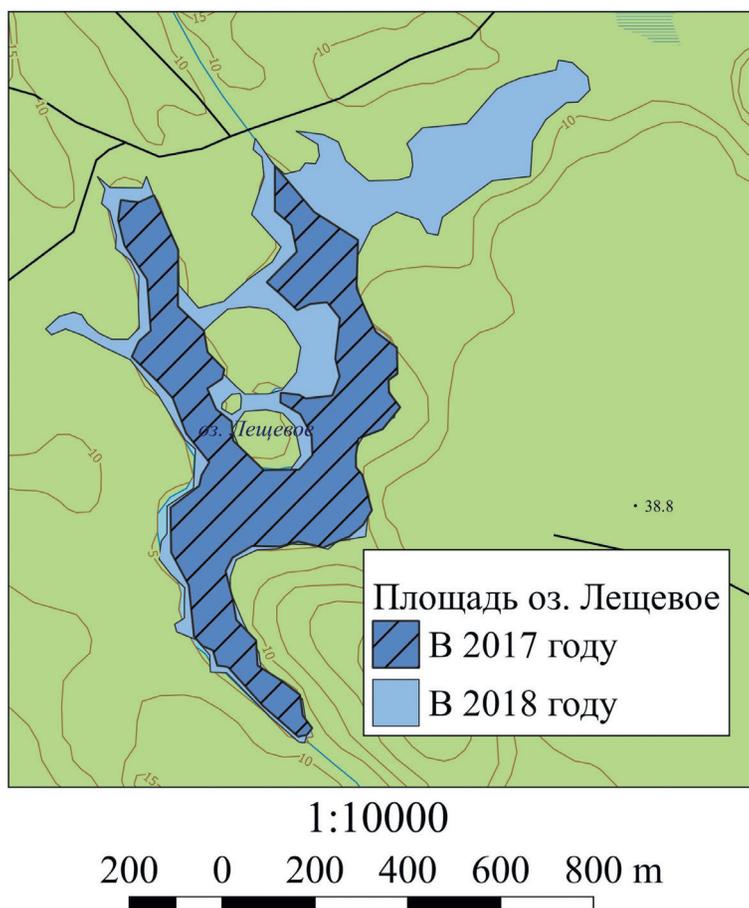


Рис. 1. Площадь Лещевого озера в отдельные периоды наблюдения.

Fig. 1. Lake Leschovoye water surface area in different observation periods.

также была включена мониторинговая станция M_NE с максимальной для Лещевого озера глубиной (7,5 м), для которой собраны и проанализированы многолетние данные (рис. 2).

В работе были проанализированы следующие лимнологические параметры: глубина, температура воды (Т), прозрачность (SD), цветность (Pt-Co), мутность (М), электропроводность (μS), активная реакция среды (рН), содержание растворенного кислорода (C_{O_2}), углекислого газа (C_{CO_2}), органического вещества (ПО), структурные показатели фитопланктона и зоопланктона. Также были проведены описания растительности на водосборной площади. Отбор проб производился из поверхностного и придонного слоев воды, количество измерений представлено в табл. 1.

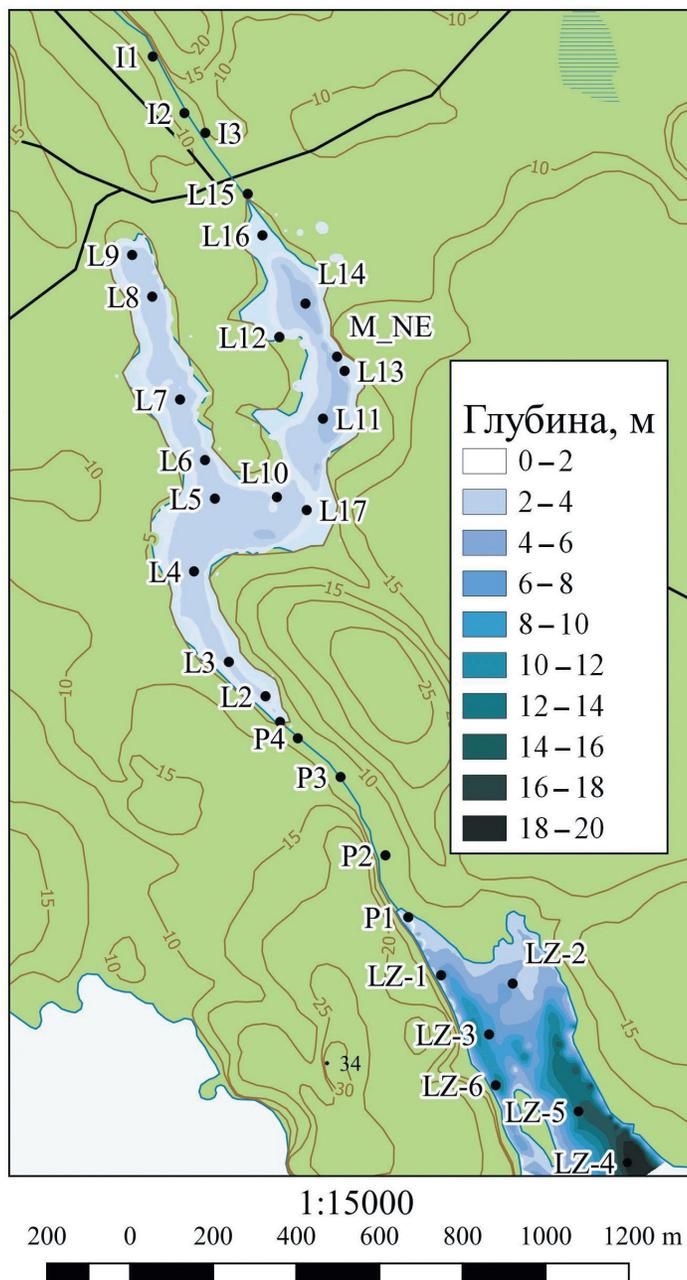


Рис. 2. Расположение станций отбора проб в Лещевом озере, Лещевом заливе и смежных протоках.

Fig. 2. Sampling sites locations in Lake Leschovoye, Leschovyi Bay and connected canals.

Таблица 1

Объем материала при проведении полевых исследований водной системы
Лещевое озеро — Лещевый залив Валаамского архипелага в июле 2018 г.

Amount of collected data during field studies
of Valaam Archipelago Lake Leschovoye — Leschovyí Bay system in July 2018

Параметр	T	C _{O₂}	C _{CO₂}	SD	pH	µS	ПО	M
Число измерений	62	62	46	27	62	62	62	26

Определение мутности и цветности осуществлялось фотометрическим методом, электропроводности и водородного показателя (pH) — электрометрическим методом. Концентрация растворенного кислорода определялась при помощи йодометрии, значения перманганатной окисляемости были получены с использованием титриметрического метода. Определение содержания растворенного углекислого газа производилось с применением титриметрии [10]. Значения прозрачности были получены путем использования белого диска. Отбор и анализ проб фитопланктона и рачкового зоопланктона проводился в соответствии с распространёнными методиками [11]. Анализ и подсчет коловраток не проводился. Температура измерялась при помощи погружного термодатчика. Измерение глубин осуществлялось при помощи совмещенного с эхолотом картплоттера Garmin GPSmap 178C Sounder. Для визуализации полученных данных использовались ГИС-программы SAGA GIS v.2.3.2 и qGIS v. 2.18.20. Статистическая обработка гидрохимических данных проводилась в программе PAST v. 3.26 [12]. Кластерный анализ был проведен по методу Уорда (Ward's method), т. к. он позволяет формировать более отчетливые кластеры [13]. Данный метод часто используют для классификации водных объектов [14—16].

Результаты и обсуждение

Лещевое озеро имеет сложную рассеченную форму котловины. Его можно разделить на две неравные части: мелководную западную и относительно глубоководную восточную с максимальными глубинами до 2,7 м и до 7,5 м соответственно.

Для озера характерен довольно большой диапазон глубин ($\Delta H = 6$ м), однако процент площадей с глубинами более 5 м довольно невелик. Он составлял 0,35 % от общей площади озера. Объем водных масс в 580 тыс. м³ в основном сконцентрирован в слое 0—3 м, что связано с небольшой средней глубиной озера (2 м) и неравномерным распределением глубин в озере.

По сравнению с озером, в Лещевом заливе перепад глубины был существенно больше ($\Delta H = 17$ м). Наименьшая из измеренных глубин зафиксирована в северной части залива, наибольшая — в южной (2,5 м и 31 м соответственно). Средняя глубина залива — 3,8 м, а доля зоны с глубиной более 5 м составляла 59 %. В связи с этим основной объем водных масс распределен в большем слое. Максимальный объем водных масс сконцентрирован в слое 0—20 м.

Измерения температур проводились на 25 станциях в различных частях системы (рис. 3).

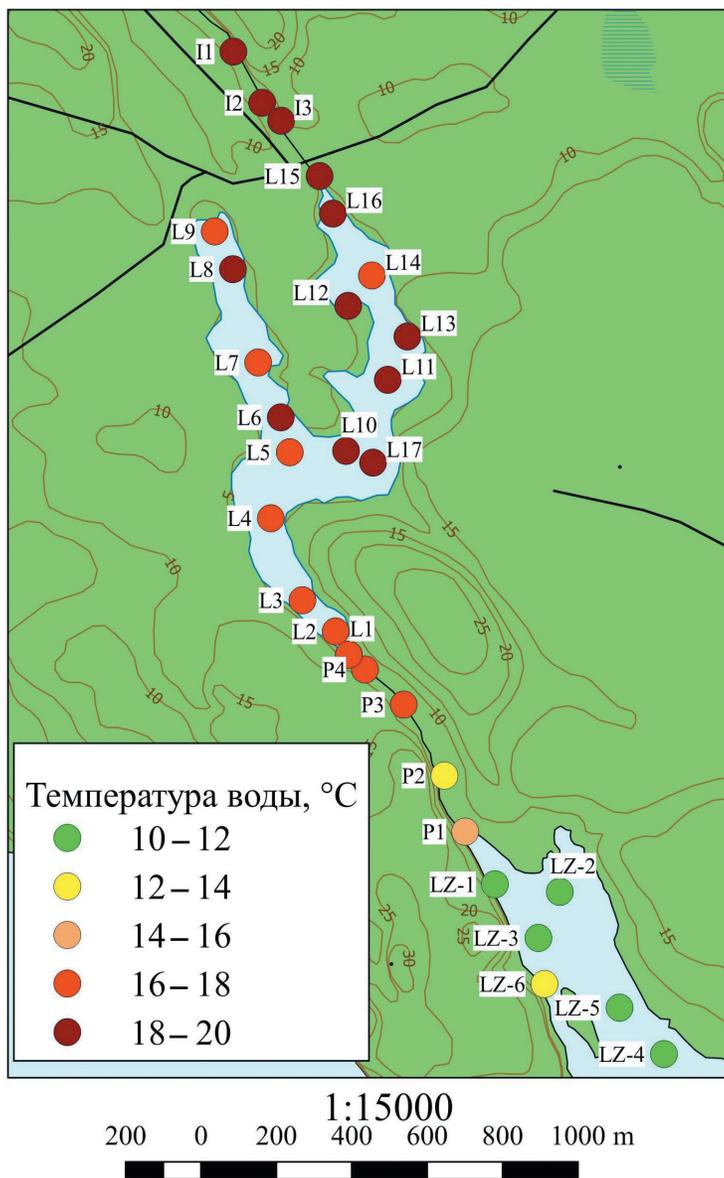


Рис. 3. Температура воды в поверхностном горизонте в различных частях системы.

Fig. 3. Surface layer water temperature in different parts of the system.

Наибольший прогрев водной толщи наблюдался в Лещевом озере и протоке Иордан, расположенной в северной части водоема. Температура этих водных объектов в поверхностном слое не опускалась ниже 17 °С. Наименьшие значения зафиксированы в зал. Лещевый, в котором максимальная температура не превышала

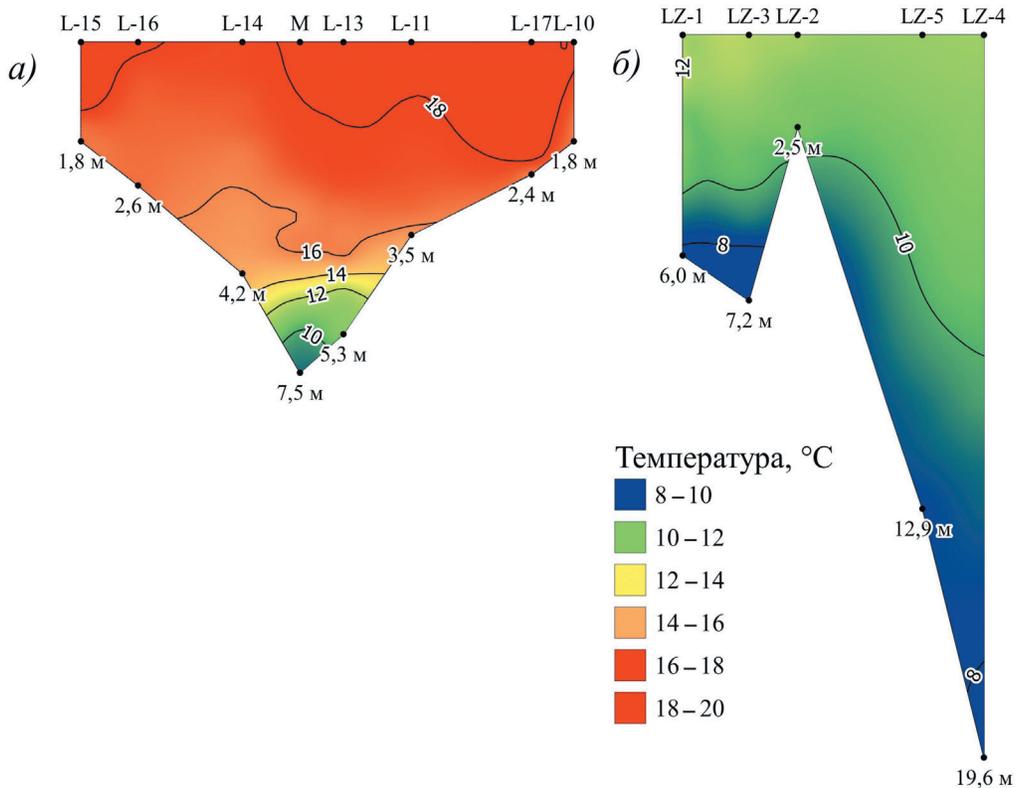


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры в восточной части Лещевого озера (а) и Лещевом заливе (б).

Fig. 4. Vertical distribution of temperature in east part of Lake Leschovoye (a) and Leschovoyi Bay (b).

13 °С. В протоке, соединяющей залив и озеро, значения температуры изменялись в диапазоне от 13 до 17 °С.

Наибольшая разность температур (Δt) в поверхностном и придонном горизонтах наблюдалась в восточной части озера Лещевое (рис. 4).

Как видно из рис. 4, в Лещевом озере разность температур между поверхностным и придонным горизонтами (Δt) составляла около 10 °С. Это говорит о выраженной температурной стратификации в данной части озера. В другой крупной части системы — Лещевом заливе, несмотря на максимальную глубину в 19 м, подобной картины не наблюдалось. Величина Δt составляла здесь не более 5 °С, что в два раза меньше, чем в озере. Более высокие температуры воды в Лещевом озере могут быть связаны с отсутствием активного перемешивания водных масс, а также с высокой светопоглощающей способностью озера. Это, в свою очередь, может быть вызвано низкими значениями прозрачности, которые в озере не превышали 1,5 м. В то время как в Лещевом заливе прозрачность в 2 раза выше.

Анализ ряда гидрохимических параметров показал, что в поверхностных горизонтах системы их значения изменялись незначительно. Наибольшим постоянством значений отличались водородный показатель (рН) и электропроводность, т. к. значения коэффициента вариации для них были наименьшими и составляли 1,8 % и 5,7 % соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Средние и экстремальные значения
ряда гидрохимических параметров в поверхностном горизонте
Mean and extreme values of set of hydrochemical parameters in surface layer

Объект	рН	Перманганатная окисляемость, мгО/л	Электропроводность, мкСм/см
Залив Лещевый	7,2 (7,2—7,3)	12,2 (11,8—12,9)	101,5 (99,3—107,0)
Лещевая протока	6,6 (6,5—6,9)	12,8 (11,1—14,4)	86,1 (70,4—100,4)
Лещевое озеро	6,7 (6,4—7,1)	15,2 (13,1—18,8)	70,0 (68,2—72,6)
Протока Иордан	6,4 (6,3—6,5)	16,0 (15,3—16,9)	88,8 (87,9—89,5)

Это может говорить о стабильности процессов, протекающих в системе в поверхностном горизонте, а также о некоторой степени водообмена между ее частями в исследуемый период. Перманганатная окисляемость ($ООВ_{Mn}$), в свою очередь, характеризовалась более выраженной изменчивостью (коэффициент вариации — 7,5 %). Обращает на себя внимание тенденция изменения значений этого параметра в поверхностном горизонте (рис. 5).

Минимальные значения $ООВ_{Mn}$ обнаружены в Лещевом заливе и южной части протоки (станции Р1 и Р2). При движении на север ее значения увеличивались и уже в северной части протоки (станции Р3 и Р4) были сопоставимы с показателями Лещевого озера. Максимальные значения в придонном горизонте установлены в северо-восточной части озера, где наиболее заметно влияние мелиорируемых полей, расположенных в непосредственной близости от уреза воды.

Для придонных слоев наибольшей изменчивостью отличались величины $ООВ_{Mn}$ и электропроводности (коэффициенты вариации составляли 9,3 % и 8,0 % соответственно) Перманганатная окисляемость в придонном горизонте озера Лещевое варьировала в диапазоне от 14,0 до 25,9 мгО/л, а электропроводность — в диапазоне 67,8—104,3 мкСм/см. Максимальные значения этих параметров были отмечено на мониторинговой станции. Минимальные значения перманганатной окисляемости было зафиксировано в Лещевой протоке, а электропроводности — на станции L-17 в центральной части Лещевого озера.

По полученным данным озеро Лещевое и протока Иордан относятся к олигоациднонейтральным водным объектам с высоким содержанием $ООВ_{Mn}$; протока, впадающая в Лещевый залив — к олигоациднонейтральным со средними значениями перманганатной окисляемости; Лещевый залив — к нейтрально-олигощелочным, также со средними значениями перманганатной окисляемости [3].

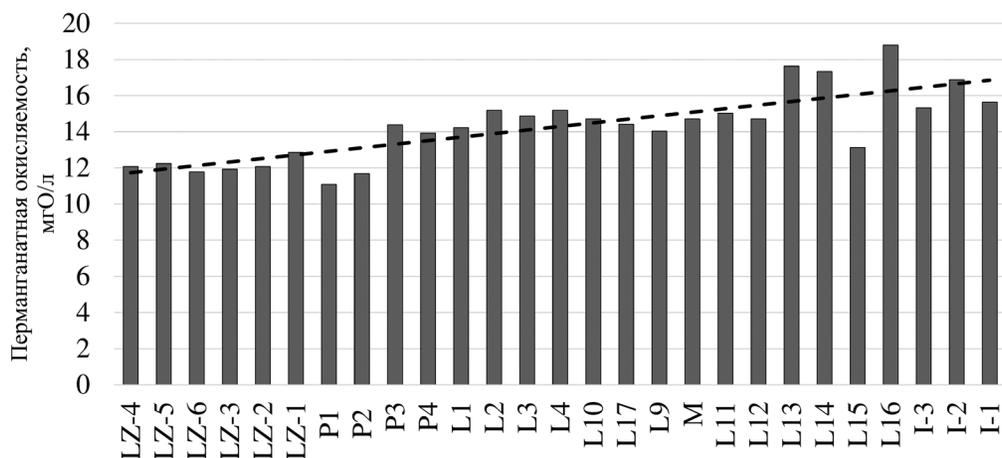


Рис. 5. Значения перманганатной окисляемости в поверхностном горизонте исследуемой системы (станции перечислены в направлении с юга на север). Пунктиром обозначена линия тренда.

Fig. 5. Permanganate index values in surface layer of the studied system (sites are listed from south to north). Trend line are marked with dashed line.

Для Лещевого озера и Лещевого залива было проведено измерение цветности. Значения в озере варьировали от 83 до 100 °Pt-Co на поверхности, достигая максимума на станции Л-16 — ближайшей к мелиорируемым полям. В придонном горизонте цветность изменялась в диапазоне от 81 до 204 °Pt-Co, достигая максимума на мониторинговой станции. Высокое значение цветности обусловлено накоплением органического и неорганического вещества за счет замедленного процесса разложения и минерализации. Это связано с развитием анаэробных процессов в придонном горизонте, вызванных крайне низкими концентрациями растворенного кислорода. Такие условия создаются за счет выраженной температурной стратификации озера и высокой плотности холодной воды. Значения цветности воды в Лещёвом заливе Ладожского озера как в поверхностном, так и в придонном горизонтах варьировали незначительно (38—43 °Pt-Co и 37—42 °Pt-Co соответственно), что связано с динамическим перемешиванием вод и низким содержанием гуминовых веществ. Согласно классификации С.П. Китаева [17] по степени окрашенности вод Лещевое озеро относится к интенсивно-окрашенным, Лещевый залив — к слабоокрашенным.

Для газового режима характерны высокие значения насыщения воды растворенным кислородом (табл. 3).

Полное отсутствие растворенного кислорода в придонном слое воды обнаружено только на мониторинговой станции в глубоководной части озера Лещевое. Вероятно, это связано с интенсивным процессом разложения органического вещества, о чем говорят высокие значения углекислого газа (57,2 мг/л). Градиент концентраций растворенного кислорода наиболее выражен в озере Лещевое, тогда как в остальных частях системы он незначителен.

Средние и экстремальные значения
концентраций растворенного кислорода и углекислого газа
Mean and extreme values of dissolved oxygen and dissolved carbon dioxide concentrations

	O ₂ , % насыщения		CO ₂ , мг/л	
	Пов	Дно	Пов	Дно
Залив Лещевый	103 (96—108)	94 (87—100)	3,3 (2,3—6,0)	4,0 (2,5—6,5)
Протока между оз. Лещевое и зал. Лещевый	105 (94—124)	98 (86—114)	—	—
Лещевое озеро	92 (72—107)	75 (0—102)	5,0 (3,0—8,3)	9,4 (3,2—57,2)
Протока «Иордан»	67 (62—82)	64 (53—79)	—	—

По классификации С.П. Китаева [17] озеро Лещевое отличается средним содержанием растворенного кислорода, протока к заливу и Лещевый залив — высоким содержанием кислорода, протока Иордан — очень низким содержанием кислорода. По содержанию двуокиси углерода в поверхностных слоях в летний период озеро Лещевое и Лещевый залив характеризовались средним содержанием углекислого газа.

Для водоема было выполнено описание характеристик фитопланктона и зоопланктона. В исследуемый период обнаружено 18 видов фитопланктона из следующих отделов: *Chlorophyta* — 6, *Cyanoprokaryota* — 4, *Bacillariophyta* — 3, *Euglenophyta* — 2, *Chrysophyta* — 2, *Raphidophyta* — 1.

Общая численность фитопланктона в озере Лещевое составляла 2,5 млн кл. дм³, биомасса — 4,3 мг/дм³. По численности доминировали цианопрокариоты (83 %), по биомассе — рафидофитовые водоросли (92 %) (табл. 4).

Таблица 4

Численность (N) и биомасса (B) крупных таксонов фитопланктона в оз. Лещевое,
июль 2018 г.

Abundance (N) and biomass (B) of phytoplankton large taxa in Lake Leschovoye, July 2018

Таксон	N, кл./дм ³	B, мг/дм ³	%N	%B
<i>Cyanoprokaryota</i>	2071	0,22	83,36	5,07
<i>Euglenophyta</i>	32,5	0,04	1,31	1,04
<i>Raphidophyta</i>	255	3,95	10,26	91,91
<i>Chrysophyta</i>	21	0,05	0,85	1,11
<i>Bacillariophyta</i>	27,5	0,03	1,11	0,69
<i>Chlorophyta</i>	77,5	0,01	3,12	0,18

Преобладание *Cyanoprokaryota* по численности связано доминированием одного вида — *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs ex Bornet & Flahault (75 % от общей численности). Высокая биомасса *Raphidophyta* вызвана активной вегетацией

Gonyostomum semen (Ehrenb.) Diesing (92 % от общей биомассы) — единственного представителя этого отдела в озере.

Доминирование по биомассе *Gonyostomum semen* определяется большим размером и объемом клеток (d клеток — 20—75 мкм). В свою очередь, размер клеток второго доминирующего вида (по численности) *Aphanizomenon flos-aquae* существенно меньше (d клеток — 5—20 мкм), поэтому этот вид не создает значительной биомассы.

По значению биомассы фитопланктона на основе классификации С.П. Китаева [17] водоем был отнесен к эвтрофным. Это подтверждается данными по содержанию хлорофилла *a* (4,85 мг/м³), на основе которых по классификации Г.Г. Винберга [17] озеро также можно определить как эвтрофное.

Зафиксированные в июле 2018 г. значения численности и биомассы были довольно низкими, но существенно не отличались от диапазона многолетних данных (табл. 5).

Таблица 5

Некоторые характеристики фитопланктона оз. Лещевое
в различные периоды наблюдения

Certain phytoplankton characteristics of Lake Leschovoye in different observation periods

Период наблюдения	Количество обнаруженных видов	N, млн. кл./дм ³	B, мг/дм ³	Трофический статус
Июль 2018 г.	18	0,003	4,30	Эвтрофный водоем
1997—2015 гг.	110	0,8—143,5	3,1—35,91	

Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что условия вегетации фитопланктона в озере за весь исследуемый период (1997—2018 гг.) существенно не изменялись. По показателю биомассы фитопланктона трофический статус озера также сохраняется.

Рачковый зоопланктон Лещевого озера в июне 2018 г. был представлен семью эврибионтными видами. Все они относятся к следующим крупным таксонам: *Cyclopoida* — 1 вид; *Calanoida* — 1 вид; *Cladocera* — 5 видов. Массовые виды представлены *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Eudiaptomus graciloides* Lilleborg и *Daphnia cristata* Sars. Все они — термофильные, их высокая встречаемость говорит о благоприятно высоких температурах воды для развития этих видов в период исследования [18]. Очевидно, что в другое время года группа массовых видов может отличаться.

За исследуемый период численность зоопланктона в озере Лещевое составляла 31,89 экз./дм³, биомасса — 0,24 мг/дм³. Распределение данных значений по основным группам зоопланктона было довольно неравномерным (рис. 6).

Доминирующей группой как по численности, так и по биомассе был отряд *Cyclopoida*. Доля *Calanoida* изменялась незначительно. Низкая биомасса *Calanoida* может говорить о наличии процессов эвтрофирования в водоеме, так как представители этой группы в эвтрофных условиях первыми начинают сокращать свою численность [19].

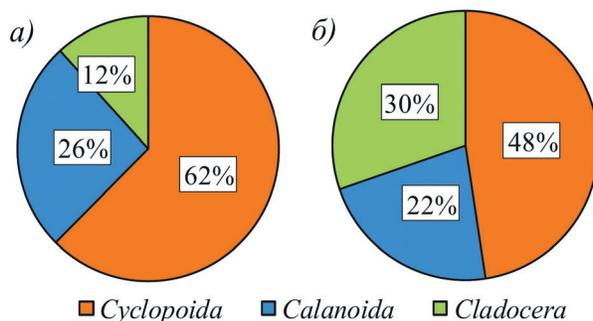


Рис. 6. Доля крупных таксонов зоопланктона в общей численности (а) и биомассе (б) оз. Лещевое, июль 2018 г.

Fig. 6. Zooplankton large taxa ratio in total abundance (a) and biomass (b) in Lake Leschovoye, July 2018

Вклад *Cladocera* в общую численность и биомассу значительно различался, что связано с высокими значениями индивидуального веса организма (ω) в этой группе. Среди кладоцер среднее значение ω составляло 0,06 мг, тогда как в других таксонах эта величина была в 10 раз меньше и не превышала 0,006 мг.

По величине биомассы зоопланктона по классификации И.А. Андронниковой [19] также была произведена оценка трофического статуса водоема. По основным классификациям озера Лещевое в июле 2018 г. относилось к олиго-мезотрофным.

Полученные данные по зоопланктону были сопоставлены с результатами анализа, проведенного в 2017—2018 гг. в период с июня по сентябрь (табл. 6).

Таблица 6

Некоторые характеристики зоопланктона оз. Лещевое в различные периоды наблюдения
Certain zooplankton characteristics of Lake Leschovoye in different observation periods

Период наблюдения	Количество обнаруженных видов	Общая численность (N), экз./дм ³	Общая биомасса (B), мг/дм ³	Трофический статус
Июль 2018 г.	7	31,89	0,24	Олиго-
2017—2018 гг.	18	11,48—18,12	0,09—0,49	мезотрофный

В целом, значительных различий по биомассе и трофическому статусу между периодами исследования не выявлено. Однако, обращает на себя внимание крайне высокое значение численности в июле 2018 г., которое в 1,7 раза больше ее максимального значения за весь период с 2017 г. по 2018 г.

Таким образом, по гидробиологическим показателям за последнее время существенных изменений в озере Лещевое обнаружено не было. Трофический статус озера, определенный по биомассе фитопланктона и зоопланктона, не совпадает. Это может быть связано с тем, что различные факторы могут лимитировать развитие фитопланктона и зоопланктона. Эвтрофный статус водоема по данным оценки биомассы фитопланктона, вероятно, связан с активным поступлением с водосбора аллохтонного органического вещества. Его высокая концентрация

в озере способствует развитию *Gonyostomum semen*, который предпочитает питание органическими соединениями.

Для анализа пространственной изменчивости ряда лимнологических параметров был использован метод главных компонент. Исходная матрица данных состояла из 9 строк и 24 столбцов. Она включала в себя значения гидрохимических параметров (строки) в поверхностном и придонном горизонтах на исследуемых станциях (столбцы). В результате были выделены три главных компоненты со скоростью сходимости 98 %, из которой 57 %, 33 % и 8 % описанной изменчивости приходились соответственно на первую, вторую и третью компоненты. По значению нагрузок наибольшей изменчивостью в поверхностном и придонном горизонтах отличались газовый режим и электропроводность. На основе полученных собственных значений первых трех главных компонент была проведена кластеризация по методу Уорда (Ward's Method) (рис. 7).

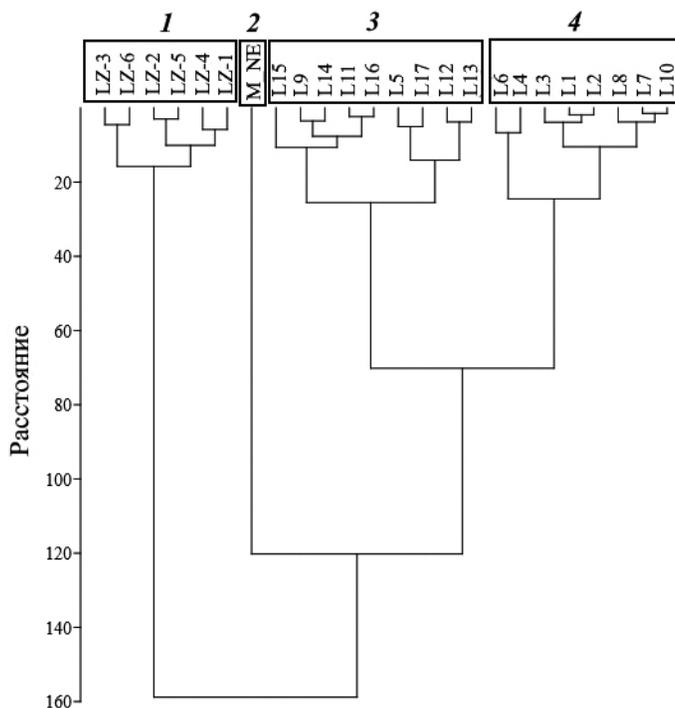


Рис. 7. Дендрограмма сходства станций в исследуемой системе (метрика — Евклидово расстояние, метод Уорда (Ward's Method)):

1 — Лещевый залив Ладожского озера, 2 — мониторинговая станция в оз. Лещевое, 3 — относительно глубоководная часть оз. Лещевое, 4 — Мелководная часть оз. Лещевое.

Fig. 7. Sites similarity dendrogram in studied system (Euclidean distance metric, Ward's Method):

1 — Leschovyi Bay of Lake Ladoga, 2 — Lake Leschovoye monitoring site, 3 — relatively deep part of Lake Leschovoye, 4 — shallow part of Lake Leschovoye.

Наибольшее различие зафиксировано между станциями в Лещевом заливе и Лещевом озере. В самом озере явно выделяются две крупные зоны — мелководная и глубоководная. Подобное разделение, вероятно, связано с разным газовым режимом в придонных слоях соответствующих зон. Станция М выделяется в отдельный кластер за счет крайне экстремальных для озера значений некоторых гидрохимических параметров: цветности (204,4 °Pt-Co), отсутствия растворенного кислорода (0 мг/л) и углекислого газа (57,2 мг/л) в придонном горизонте.

В относительно глубоководной части озера в придонном горизонте наблюдался дефицит, а в некоторых случаях полное отсутствие кислорода. Это влечет за собой образование сероводорода (определяемого органолептически), накопление углекислого газа и ионов аммония. Накопление различных соединений в придонном горизонте озера Лещевое было отмечено и в более ранних исследованиях [3]. В подобных условиях может увеличиваться электропроводность, что и было зафиксировано на станциях с глубиной более 5 м.

Было проведено сопоставление озера Лещевое с другими озерами Валаамского архипелага по гидрохимическим и гидробиологическим параметрам. По величинам, характеризующим содержание органического вещества, озеро является довольно типичным для архипелага [3]. Однако, водоем выделяется заметным вертикальным градиентом содержания углекислого газа. Концентрация в поверхностном и придонном горизонтах может отличаться в 4—7 раз. Структура фитопланктона в озере Лещевое сходна с большинством водоемов Валаама. Озеро характеризуется высокой (60—70 %) долей *Raphidophyta* в общей биомассе и доминированием цианопрокариот и зеленых водорослей по численности. Общие значения как численности, так и биомассы, довольно невысоки [20]. Рачковый зоопланктон водоема наряду с Крестовым, Антоньевским озерами и озером Сисяярви характеризуется высоким видовым разнообразием, более выровненной таксономической структурой без ярко выраженных видов-доминантов и высокой индивидуальной массой тела относительно других водоемов архипелага [21].

Полученные значения ряда лимнологических параметров для озера Лещевое были также сопоставлены с некоторыми водоемами материковой части республики Карелия. Для этого были выбраны несколько озер со сходными морфометрическими параметрами, расположенных на территории северного побережья Ладожского озера (табл. 8).

Таблица 8

Значения ряда лимнологических параметров оз. Лещевое (Валаамский архипелаг) и некоторых озер материковой части республики Карелия [1, 22]

Values of set of limnological parameters in Lake Leschovoye (Valaam Archipelago) and some inland Karelian lakes

Озеро	S, км ²	H _{ср} , м	H _{max} , м	SD, м	°Pt-Co	ПО, мгО/л	СО ₂ , мг/л	pH
Лещевое	0,17	3,14	7,5	1,5-2	99	15,2	3,0—8,3	6,4—7,1
Хияярви	0,94	3,4	9,4	1,7	56—64	7,7	0,7—1,4	6,4
Большое Валькеалампи	0,22	3,3	8	2,7	80—90	9,5—12,5	2,6—15,1	6,6—6,8
Малое Валькеалампи	0,12	2,5	7,5	1,8	70—90	13,6—14,8	4,6—5,0	6,6
Валкеаярви	0,3	2	12	2,7	35—49	5,2—7,4	1,6	6,2—6,4

По параметрам, характеризующим поступление органического вещества (прозрачность, цветность, перманганатная окисляемость) все озера были разделены на несколько групп:

1 — мезополигуמוзные, с высокой перманганатной окисляемостью и низкой прозрачностью;

2 — мезополигуמוзные, со средней перманганатной окисляемостью и средней прозрачностью;

3 — мезогуמוзные, со средней перманганатной окисляемостью и низкой прозрачностью;

4 — мезогуמוзные, с низкой перманганатной окисляемостью и средней прозрачностью.

К первой группе с максимальными значениями цветности и органического вещества было отнесено только Лещевое озеро. Во вторую группу вошло озеро Большое Велькеалампи, в третью — озера Хияярви и Малое Велькеалампи, в четвертую — озеро Валкеаярви.

Содержание растворенной двуокиси углерода (CO_2) в озере Лещевое варьировало в диапазоне от среднего до высокого, что незначительно отличалось от большинства анализируемых озер. Концентрация CO_2 в них отмечена на среднем уровне. Наибольший диапазон значений этого параметра наблюдался в озере Большое Велькеалампи.

По активной реакции среды Лещевое озеро отличалось более широким диапазоном значений, занимая положение между ацидо-нейтральным и нейтрально-щелочным водоемами. Остальные озера Карелии были ацидо-нейтральными.

Фитопланктон Лещевого озера существенно отличался доминантными видами. Характерная для него активная вегетация *Aphanizomenon flos-aquae* и *Gonyostomum semen* в других озерах не наблюдалась. Доминантный комплекс в них был представлен в основном цианопрокариотами *Gleocapsa spp.*, *Anabaena flosaquae* (Lyngb.) Vreb и *Merismopedia punctata* Meyen. Отсутствие в озерах северного побережья Ладожского озера крупноклеточного *Gonyostomum semen* объясняет невысокие значения биомассы фитопланктона (0,079—0,657 мг/дм³). В то время как биомасса фитопланктона в Лещевом озере была 4,3 мг/дм³, что фактически выше на порядок.

Видовой состав рачкового зоопланктона во всех сопоставляемых озерах был довольно сходным и представлен в основном эврибионтными видами: *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Daphnia cristata* Sars. Численность зоопланктона в озере Лещевое не отличалась экстремальными значениями и находилась в диапазонах, зафиксированных для материковых озер Карелии (19,3—58,3 тыс. экз./м³). Биомасса же была минимальной, ее значение не превышало 0,3 г/м³. В других озерах эта величина не опускалась ниже 0,4 г/м³.

Заключение

Из анализа системы «Лещевое озеро — протока — Лещевый залив» в июле 2018 г. следует, что наибольшей изменчивостью характеризовались следующие показатели: цветность, перманганатная окисляемость и электропроводность.

Характерной особенностью озера можно считать значительную вариабельность значений электропроводности и содержания углекислого газа в придонном горизонте, связанную с температурной стратификацией данного водоема в летние месяцы.

На основе проведенного анализа гидрохимических параметров Лещевое озеро относится к мезополигуменным водоемам — наиболее распространенным на архипелаге, что согласуется с более ранними данными [3]. Структура фито- и зоопланктона исследуемого озера также довольно типична для большинства водоемов Валаама [20, 21]. В озере доминируют цианопрокариоты и зеленые водоросли (по численности) и рафидофитовые (по биомассе). Общие значения как численности, так и биомассы довольно невысоки. Зоопланктон водоема характеризуется относительно высоким видовым разнообразием, выровненной таксономической структурой и высокой индивидуальной массой тела по сравнению с водоемами архипелага.

Сопоставление с малыми водоемами северного побережья Ладожского озера показало, что Лещевое озеро отличается более высокими значениями таких параметров, как цветность и перманганатная окисляемость, связанных с поступлением аллохтонного органического и неорганического вещества. Это, в первую очередь, связано с геологическими особенностями Валаамского архипелага. Кроме того, водосбор озера отличается повышенной заболоченностью, и в водоем поступает большой объем окрашенных гуминовых веществ. Также с регулярно распахиваемых полей постоянно поступают илистые частицы и коллоидная фракция, богатые органическим веществом. Для фитопланктона Лещевого озера были характерны более высокие значения биомассы, на порядок превосходящие биомассу в материковых водоемах Карелии. Это связано с активной вегетацией крупноклеточного вида рафидофитовых водорослей *Gonyostomum semen*.

Озеро имеет довольно сложную форму, а антропогенное воздействие зафиксировано только в западном заливе. Помимо этого, водоем отличается большой площадью водосбора, и процессы, протекающие на этой территории, как упоминалось ранее [7], оказывают значительное влияние на его экологическое состояние. Поэтому наблюдения за пространственным распределением исследованных параметров представляют определенную ценность. Они позволяют оценивать влияние на отдельные части озера как внутриводоемных процессов, так и стока с водосбора. Совместный анализ пространственной и временной изменчивости лимнологических параметров можно рассматривать как основное направление дальнейших исследований.

Список литературы

1. Менишуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С. Экспертная система «Озера Карелии». 1. Порядковые и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. № 2. С. 160—171.
2. Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 464 с.
3. Степанова А.Б., Шарафутдинова Г.Ф., Воякина Е.Ю. Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 97—110.

4. Гнатюк Е.П., Крышень А.М., Кузнецов О.Л. Биогеографическая характеристика приграничной Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 2. С. 12—22.
5. Кучко А.А., Лазарева И.П., Морозова Р.М. Валаам — феномен природы. Петрозаводск: Карелия, 1988. 108 с.
6. Шешукова А.А., Шибина Т.Д., Матинян Н.Н. Минеральный состав магматических почвообразующих пород острова Валаам // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2006. Сер. 3. Вып. 1. С. 125—130.
7. Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20 и 21 веков. Черты уникальности и современное состояние: Атлас / Под ред. А.Б. Степановой. СПб.: РГГМУ, 2016. 44 с.
8. Боев А.С., Дмитриев Ф.А. Оценка загрязненности почв и растительности о. Валаам нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 25. С. 122—131.
9. Кучко А.А., Белоусова Н.А., Кравченко А.В., Крутов В.И., Лазарева И.П., Морозова Р.М. Экосистемы Валаама и их охрана. Петрозаводск: Карелия, 1989. 199 с.
10. Алевкин О.А., Семёнов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
11. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
12. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. No. 4. P. 1—9.
13. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
14. Суханова М.П. Анализ пространственных закономерностей изменчивости гидрохимических показателей малых рек в бассейнах с различными системами природопользования (на примере Белгородской области) // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 188—196.
15. Прядко М.П., Голушов П.В., Корнилов А.Г., Колмыков С.Н., Гордеев Л.Ю. Анализ пространственно-временных закономерностей изменчивости гидрохимических показателей р. Болховец (притока р. Северский Донец) // Научные ведомости БелГУ. 2012. № 21. С. 160—167.
16. Гончаров А.В., Заславский М.Б., Исаев В.А. и др. Типы кислородного режима рек бассейна Оби // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 69—76.
17. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
18. Rogozin A.G., Snit'ko L.V., Timoshkin O.A. Термоиндикаторные свойства зоопланктона и их измерение // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 1. С. 85—91: doi: 10.7868/S0321059615010125.
19. Андронникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
20. Воякина Е.Ю. Фитопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 22 с.
21. Степанова А.Б. Зоопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 1998. 19 с.
22. Рыжков Л.П. Озера бассейна Северной Ладоги. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 1999. 380 с.

References

1. Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potahin M.S. «Karelian lakes» expert system: 1. Ordinal and nominal characteristics of lakes. *Vodnye resursy*. Water resources. 2009, 2: 160—171. [In Russian].
2. *Ozera Karelii*. Lakes of Karelia. Petrozavodsk: Karelian research centre of RAS, 2013: 464 p. [In Russian].
3. Stepanova A.B., SHarafutdinova G.F., Voyakina E.YU. Hydrochemical features of Valaam Island small lakes. *Uchyonye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSHU. 2010, 12: 97—110. [In Russian].
4. Gnatyuk E.P., Kryshen' A.M., Kuznecov O.L. Near-border Karelia biogeographical characteristic. *Trudy KarNC RAN*. Proceedings of KarSC of RAS. 2011, 2: 12—22. [In Russian].

5. Kuchko A.A., Lazareva I.P., Morozova R.M. *Valaam — fenomen prirody*. Valaam — nature phenomenon. Petrozavodsk: Kareliya, 1988: 108 p. [In Russian].
6. Sheshukova A.A., Shibina T.D., Matinyan N.N. Mineral composition of magmatic mother rocks of Valaam island. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. Herald of Saint Petersburg university. 2006, 1: 125—130. [In Russian].
7. *Ekosistemy Valaamskogo arhipelaga (Ladozhskoe ozero) na rubezhe 20 i 21 vekov. Cherty unikal'nosti i sovremennoe sostoyanie*. Valaam Archipelago (Lake Ladoga) ecosystems at the turn of the 20th and 21st centuries. Unique features and the current state. Saint Petersburg: RSHU, 2016: 44 p. [In Russian].
8. Boev A.S., Dmitriev F.A. Soils and plants contamination assessment from heavy metal and petroleum products pollution in Valaam island. *Uchyonye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSHU. 2012, 25: 122—131. [In Russian].
9. Kuchko A.A., Belousova N.A., Kravchenko A.V., Krutov V.I., Lazareva I.P., Morozova R.M. *Ekosistemy Valaama i ih ohrana*. Valaam ecosystems and their protection. Petrozavodsk: Kareliya, 1989: 199 p. [In Russian].
10. Alekin O.A., Semyonov A.D., Skopincev B.A. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushy*. Manual for inland waters chemical analysis. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973: 269 p. [In Russian].
11. *Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem*. Manual for freshwater ecosystems hydrobiological monitoring. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992: 320 p. [In Russian].
12. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001, 4: 1—9.
13. Kim Dz.-O., M'yuller CH.U., Klekka U.R. *Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz*. Factor, discriminative and cluster analysis. Moscow: Finansy i statistika, 1989: 215 p. [In Russian].
14. Sukhanova M.P. The analysis of the spatial regularities of the small rivers hydrochemical characteristics variability in basins with various systems of the natural management (on example Belgorod region). *Uspekhi sovremennoy estestvoznaniya*. Advances in contemporary natural sciences. 2016, 4: 188—196. [In Russian].
15. Pryadko M.P., Goleusov P.V., Kornilov A.G., Kolmykov S.N., Gordeev L.YU. The analysis of space-time patterns of the hydrochemical indices variability of the Bolkhovetz river. *Nauchnye vedomosti BelGU*. Scientific bulletin of BelSU. 2012, 2: 160—167. [In Russian].
16. Goncharov A.V., Zaslavskiy M.B., Isaev V.A. Oxygen regimen types of rivers of Ob river watershed. *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and natural resources. 2013, 3: 69—76. [In Russian].
17. Kitaev S.P. *Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ihtiologov*. Limnology basics for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian research centre of RAS, 2007: 395 p. [In Russian].
18. Rogozin A.G., Snit'ko L.V., Timoshkin O.A. Temperature-indicating characteristics of zooplankton and their measurement. *Vodnye resursy*. Water resources. 2015, 1: 160—171. [In Russian]. doi: 10.7868/S0321059615010125.
19. Andronnikova I.N. *Strukturno-funktional'naya organizatsiya zooplanktona ozernykh ekosistem raznykh troficheskikh tipov*. Structural and functional zooplankton organization of different trophic types lake ecosystems. Saint Petersburg: Nauka, 1996: 189 p. [In Russian].
20. Voyakina E.YU. *Fitoplankton vnutrennih vodoemov Valaamskogo arhipelaga i prilgayushchej akvatorii Ladozhskogo ozera*. Phytoplankton of the inland water reservoirs of the Valaam archipelago and near Lake Ladoga water area. Saint Petersburg: Federal State Budget Scientific Institution “Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography”. 2007: 22 p. [In Russian].
21. Stepanova A.B. *Zooplankton vnutrennih vodoemov Valaamskogo arhipelaga i prilgayushchej akvatorii Ladozhskogo ozera*. Zooplankton of the inland water reservoirs of the Valaam archipelago and near Lake Ladoga water area. Limnology institute of RAS. 1998: 19 p. [In Russian].
22. Ryzhkov L.P. *Ozera bassejna Severnoy Ladogi*. Lakes of the North Ladoga watershed. Izd-vo Petrozavodskogo gosudarstvennogo universitet, 1999: 380 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.04.2020

Принята после доработки к публикации 27.06.2020

Сведения об авторах

Чернышев Александр Николаевич, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, chernyshev.alexander2015@yandex.ru.

Сергеева Вероника Олеговна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, sergeevaveronika@bk.ru.

Котова Анастасия Константиновна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, nasty-1255@mail.ru.

Никитина Светлана Николаевна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, svetansn@yandex.ru.

Бабин Александр Валерьевич, старший преподаватель кафедры прикладной и системной экологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, alex-babin@yandex.ru.

Воякина Екатерина Юрьевна, канд. биол. наук, доцент кафедры прикладной и системной экологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, katerina.voyakina@gmail.com.

Степанова Анастасия Борисовна, канд. биол. наук, доцент кафедры прикладной и системной экологии, начальник Учебно-научной станции на о. Валаам, Российский государственный гидрометеорологический университет, ab-stepanova@yandex.ru.

Information about authors

Chernyshev Alexandr Nikolaevich, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Sergeeva Veronika Olegovna, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Kotova Anastasiya Konstantinovna, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Nikitina Svetlana Nikolaevna, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Babin Aleksandr Valer'evich, senior teacher, Department of Applied and Systems Ecology, Russian State Hydrometeorological University.

Voyakina Ekaterina YUr'evna, PhD (Biol. Sci.), Associate Professor, Department of Applied and Systems Ecology, Russian State Hydrometeorological University.

Stepanova Anastasiya Borisovna, PhD (Biol. Sci.), Associate Professor, Department of Applied and Systems Ecology, Head of Education and Scientific Station "Valaam", Russian State Hydrometeorological University.

УДК 551.513.11

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-480-493

Парадокс Россби и его решение

*В.Г. Гневнышев¹, Т.В. Белоненко²*¹ Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Москва² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, btvlisab@yandex.ru

В работе рассмотрены вопросы, возникающие при анализе взаимодействия волн Россби и струйных течений при анализе спутниковых альтиметрических данных. Обычно такое взаимодействие рассматривают в рамках линейной теории, где в дисперсионном соотношении для фазовой скорости появляется дополнительное слагаемое — доплеровская добавка, то есть скорость фонового течения. Однако при этом возникает парадокс, который был сформулирован еще в 1939 г. Карлом Россби. Парадокс заключается в том, что фазовые скорости волн Россби и скорости течений несопоставимы по величине: обычно они в несколько раз, а иногда и на порядок, превышают фазовые скорости волн Россби, что противоречит логике суммирования фазовой скорости с доплеровской добавкой. В работе обсуждается этот парадокс и пути его решения.

Ключевые слова: волны Россби, ВКБ-приближение, нелинейность, дисперсионное уравнение, доплеровский сдвиг, фоновое течение.

The Rossby paradox and its solution

*V.G. Gnevyshev¹, T.V. Belonenko²*¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia² Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, btvlisab@yandex.ru

We deals with issues that arise in the analysis of the interaction of Rossby waves and currents. Usually, such an interaction is considered within the framework of a linear theory, where an additional term appears in the dispersion relation for the phase velocity. It is the Doppler addition, that is the velocity of the background flow. However, in this case, a paradox arises, which was formulated by Carl Rossby in 1939. The paradox consists in the fact that the phase velocities of Rossby waves and currents are not comparable in magnitude since the velocities of the current are usually several times (an order of 1—2 magnitude more) exceed the phase velocities of Rossby waves. Analysis based on altimetry data also confirms this contradiction. All this makes it impossible to interpret the interaction of Rossby waves and flows in terms of simple Doppler effect. The solution to the paradox should be sought in a nonlinear theory. The paper discusses the stages of the appearance of this paradox and the ways of its solution. We show that in the long-wavelength approximation, nonlinearity can compensate not only weak dispersion, but also a more significant factor — the Doppler shift. This means that the waves are not stopped by the counter current, the speed of which is many times higher than the speed of the waves. Moreover, the waves are intensified, receiving additional source transformations due to nonlinearity. Based on satellite altimetry data, this paradox is illustrated for the Kuroshio and Antarctic Circumpolar Current regions.

Keywords: Rossby waves, WKB approximation, nonlinearity, dispersion equation, Doppler shift, background flow.

For citation: *V.G. Gnevyshev, T.V. Belonenko. The Rossby paradox and its solution. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 61: 480—493. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-480-493*

Введение

Из теории нелинейных систем известно, что в рамках уравнения Кортевега — де Фриза (КдФ) нелинейность в точности компенсирует дисперсию. Компенсируя действие дисперсии, нелинейность дает возможность формироваться в дисперсионной среде стационарным волнам конечной амплитуды — уединенным (солитоны) и периодическим (кноидальные волны) [1, 2]. Дисперсия «растаскивает» волновой пакет, в то время как нелинейность стремится сделать огибающую более крутой. В результате эти два фактора, действующие в противоположных направлениях, полностью уравнивают друг друга. Как следствие, появляются локализованные стационарные решения — солитоны. Поскольку в длинноволновом пределе дисперсия гравитационных волн является слабой, стремящейся к нулю, то фактически и нелинейность в таких решениях также является слабой. Поэтому решения солитонного типа КдФ-уравнения называют «слабонелинейными», что, в некотором смысле, принижает заслуги нелинейности, как некоего управляющего фактора.

В линейной постановке задачи, чтобы получить решение в виде стационарных неподвижных волновых возмущений, можно поступить следующим образом. Предположим, например, что линейная одномерная волна Россби распространяется на запад с фазовой скоростью $c_0 < 0$. Данная волна может быть остановлена направленным на восток встречным течением $U > 0$. Тогда фазовая скорость волны c в линейной постановке будет равна сумме собственной фазовой скорости c_0 и доплеровской добавке в виде скорости течения U , то есть $c = c_0 + U$. Отсюда следует, что для любой волны Россби можно подобрать соответствующее течение, которое остановит распространение волны, и в итоге мы получим стационарное неподвижное волновое решение $c = 0$. Именно так рассуждал Карл Россби, используя такой прием, когда в 1939 г. сначала вывел дисперсионное соотношение для линейных волн, получивших впоследствии его имя, а затем применил его для объяснения стационарных волновых образований в атмосфере. Полученное дисперсионное соотношение для линейных волн Карл Россби называл «приближенным» [3].

Далее Карл Россби получил дисперсионное соотношение для фазовой скорости нелинейных волн Россби. В полученном выражении скорость фонового течения иначе влияет на распространение нелинейных волн по сравнению предыдущим случаем — линейным приближенным дисперсионным соотношением. Поскольку конкретные оценки Карла Россби для параметров атмосферы вызвали несущественные расхождения между линейными (приближенная формула) и точными, полученными по нелинейной формуле для скорости волн, и составили порядка 10 %, то дальнейший анализ этого расхождения Карл Россби не проводил. В современной трактовке этот результат объясняется как некая способность нелинейности создавать уклоны свободной поверхности, приводящие к появлению некоего эффективного β^* , который влияет на скорость распространения волны $\beta \rightarrow \beta^*$ (см. [4, 5], где трактовки очень похожи). В этой работе, перегруппировав слагаемые, мы предложим иную трактовку этого расхождения, позволяющую увидеть результаты с другой точки зрения.

Таким образом, β -параметр и дисперсионное соотношение для линейных и нелинейных баротропных планетарных волн (хотя и одномерное) с учетом доплеровского сдвига и учета завихренности фонового потока появилось в знаменитой работе Россби, опубликованной в 1939 г. Именно в этой работе появляется утверждение — длинные волны бегут на запад, короткие на восток. Там же Россби формулирует свой парадокс, который заключается в следующем, что линейные и нелинейные волны Россби по-разному реагируют на фоновое течение. Чтобы остановить нелинейную волну Россби с заданным волновым числом k требуется более сильное встречное течение по сравнению с линейной волной. Этот парадокс позже продублировал Дж. Педлоски [5], но не называет его именем Россби и не дает решения. Ответ на парадокс Россби, однако, лежит в нелинейности явления. Как показано в работе [6], нелинейность существенно конкурирует с доплеровским сдвигом, и для длинных волн наблюдается полное взаимное уничтожение этих эффектов.

Следует отметить, что Россби выделяет важность работы Бьеркнеса [7] в статье 1939 г., где впервые появляется понятие баротропного радиуса. Однако сам Россби его так не называет и определяет, как характерную величину, которая задает некий масштаб длин волн [3]. Однако ранее он этим же знаком обозначает радиус кривизны поверхности океана [8]. Отличие работ Бьеркнеса и Россби состоит в том, что, согласно Бьеркнесу, для бароклинических движений в атмосфере принципиальным моментом колебательных процессов является дивергенция в горизонтальной плоскости, в то время как Россби показал, что колебательные процессы могут существовать в океане и в бездивергентном режиме. Однако в его более поздней работе [9], где упоминается термин «радиус кривизны траектории столбца жидкости», динамические уравнения Россби очень близки к динамическим уравнениям из работы [7], которую Россби цитирует.

Отметим следующий результат Россби. При переходе от линейных решений к нелинейным длина волны нелинейного стационарного решения в 3,39 раз меньше соответствующей длины волны для линейного случая ([9], формула 46). Более того, стационарная волна конечной амплитуды значительно короче соответствующей стационарной линейной волны очень малой амплитуды. Данный факт ставит под сомнение результаты линейной бароклинической неустойчивости, которая подразумевает, что наиболее неустойчивые линейные волны и дают характерные масштабы вихревых океанских образований.

Парадокс, о котором идет речь в данной статье, заключается в следующем. Согласно Россби, для любой волны можно подобрать соответствующее течение, которое остановит распространение этой волны: $c = c_0 + U$, и в итоге мы получаем стационарное неподвижное волновое решение $c = 0$. Однако это утверждение вступает в конфликт с тем фактом, что в реальном океане фазовые скорости c_0 , как минимум, на порядок меньше скоростей течения U , поэтому доплеровское сложение в принципе не может дать стационарного решения. И, таким образом, «течение не может остановить волну», как ранее утверждал Россби.

В нашей работе парадокс Россби разрешается следующим образом. Мы покажем, что в длинноволновом пределе сопротивление нелинейности доплеровскому

сдвигу настолько велико, что нелинейность (по аналогии с решениями КдФ уравнения) в точности компенсирует доплеровский сдвиг. В результате длинные нелинейные волны Россби перестают «чувствовать» фоновое стационарное течение и распространяются вне зависимости от абсолютного значения его скорости. При этом мы не будем делать никаких предположений о малости величины фонового течения U , которое и порождает доплеровский сдвиг.

Исходя из длинноволнового приближения, мы покажем, что в длинноволновом пределе именно нелинейность способна компенсировать не только слабую дисперсию, но и более существенный фактор — доплеровский сдвиг. Интерес к длинноволновому приближению волн Россби в последние годы стимулируется многочисленными работами с использованием альтиметрических данных. Оказывается, что наиболее интересен с прикладной точки зрения именно длинноволновой предел волн Россби. Такое независимое поведение нелинейных волн Россби (вихрей) в океане от фонового течения хорошо видно на альтиметрических данных, где распространение вихрей происходит квазинезависимо от скорости фонового течения (например, для Куроисио, Гольфстрим и т. д.). В работе [6] ответ на парадокс Россби иллюстрируется для акватории Антарктического циркумполярного течения.

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование и разрешение парадокса Россби, который формулируется следующим образом: для любой волны можно подобрать соответствующее течение, которое остановит распространение этой волны.

Основные формулы и их анализ

Рассмотрим нелинейное уравнение квазигеострофической завихренности на β -плоскости [5, 10]:

$$\frac{d_h}{dt} \left[\nabla_h^2 \Psi + \left(\frac{1}{S} \Psi_z \right)_z + \beta y \right] = 0, \quad (1)$$

где Ψ — функция тока, $\beta = \frac{df}{dy}$, f — параметр Кориолиса, $S = \frac{N^2}{f^2}$, N — частота

Брента-Вяйсаля,

$$\frac{d_h}{dt} \equiv \left[\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \right], \quad \nabla_h^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (2)$$

ось x направлена на восток, ось y — на север, а ось z — вверх. Результат, который Россби получил в 1939 г. [3], состоит в следующем. Рассмотрим два случая.

1. Дисперсионное соотношение для линейных волн Россби

В терминологии Россби это дисперсионное соотношение называется приближенным [3].

Предположим, что на фоне основного баротропного зонального потока есть малые возмущения. Тогда общее решение $\Psi(x, y, t)$ уравнения завихренности (1) ищем в виде:

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi_0(y) + \varepsilon_A \Psi_A(x, y, z, t), \quad (3)$$

где $\Psi_0(y)$ — основное стационарное фоновое течение, а $\Psi_A(x, y, t)$ — наложенные на него малые возмущения, ε_A — малый параметр, характеризующий отношение амплитуд возмущений к фоновому течению.

Полагая для простоты стратификацию постоянной, а $\Psi_0(y) = -Uy$, где U — зональная составляющая скорости течения, решения для возмущений можно представить в следующем виде:

$$\Psi_A(x, y, z, t) = \Pi(z) \exp[i(kx + ly - \omega t)], \quad (4)$$

где k и l — зональное и меридиональное волновые числа, $\Pi(z)$ — амплитуда (решение спектральной задачи по z). Тогда получаем следующее выражения для фазовой скорости линейных волн Россби:

$$c = -\frac{\beta}{k^2 + l^2 + a^{-2}} + U, \quad (5)$$

где $a = \frac{NH}{\pi f_0}$ — радиус деформации Россби, $N \equiv \text{const}$ — частота Вайсая—Брента, $H \equiv \text{const}$ — глубина океана, f_0 — параметр Кориолиса, $\beta = \frac{df}{dy}$ — параметр

приближения β -плоскости, n — номер моды. Для постоянной глубины H переменные разделяются.

В оригинальной работе [3] поперечная компонента волнового вектора равна нулю. Выражение (5) является законом сложения скоростей: собственной фазовой

скорости волн $c_0 = -\frac{\beta}{k^2 + l^2 + a^{-2}}$ и доплеровского сдвига U , которое можно трак-

товать следующим образом: для того, чтобы «остановить» волну, распространяющуюся на запад с фазовой скоростью c_0 , нужно добавить течение, направленное в противоположную сторону, на восток, и которое имеет такую же по величине скорость: $U_1 = -c_0$ или

$$U_1 = \frac{\beta}{k^2 + l^2 + a^{-2}}. \quad (6)$$

Именно в таком ключе рассуждал Hughes [11, 12], когда обсуждал волновод в Антарктическом циркумполярном течении и баланс его завихренности.

2. Дисперсионное соотношение для нелинейных волн Россби

Для нелинейных волн, решение уравнения завихренности (1) ищем в виде:

$$\Psi(x, y, z, t) = -Uy + \Pi(z) \exp[i(kx + ly - \omega t)]. \quad (7)$$

Отметим, что в выражении (7) нет малого параметра. Тогда, согласно [3], имеем следующее дисперсионное соотношение для нелинейных волн Россби (см. [5], формула (3.18.9)):

$$c_n = \frac{U(k^2 + l^2) - \beta}{k^2 + l^2 + a^{-2}}. \quad (8)$$

Отсюда Россби находит вторую скорость U_2 , которую необходимо «приложить», чтобы «остановить нелинейную волну» (чтобы волна стала стационарной):

$$U_2 = \frac{\beta}{(k^2 + l^2)}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что

$$U_2 > U_1. \quad (10)$$

Таким образом, получается что необходимо приложить более сильное течение для нелинейной волны, по сравнению с линейной, чтобы она стала стационарной. Можно даже сказать, что нелинейная волна меньше подвержена доплеровскому влиянию. О двояком характере влияния течения на нелинейную волну через изменение градиента эффективного потенциального вихря указывают также [4, 5].

Отметим, однако, следующий интересный факт. Сначала перепишем дисперсионное соотношение для нелинейных волн Россби в виде, где нелинейный фактор выделим в отдельное (второе) слагаемое:

$$c_n = -\frac{\beta}{k^2 + l^2 + a^{-2}} - U \frac{a^{-2}}{k^2 + l^2 + a^{-2}} + U. \quad (11)$$

В таком виде выражение для фазовой скорости нелинейных волн Россби гораздо легче сравнить с выражением (5) для линейных волн, в котором:

- первое слагаемое — собственная фазовая скорость линейной волны;
- второе слагаемое — нелинейное сопротивление волны доплеровскому сдвигу (стремление нелинейности компенсировать влияние доплеровского сдвига);
- третье слагаемое — доплеровский сдвиг (добавка).

Важно отметить, что нелинейность и доплеровский сдвиг всегда имеют противоположные знаки, что наводит на некую аналогию с нелинейностью и дисперсией. Первое и третье слагаемые — это в точности полученное ранее выражение для фазовой скорости линейных волн. Второе слагаемое — это и есть нелинейная добавка.

Как показывают результаты последних исследований [13], наиболее актуальным для океана является длинноволновое приближение $k^2 + l^2 \ll a^{-2}$. Тогда из (11) видно, что чем длиннее волна, тем она все менее и менее подвержена влиянию доплеровского сдвига, и в предельном случае нелинейная добавка в точности компенсирует доплеровский сдвиг [6]. В результате, получаем следующее выражение для фазовой скорости нелинейной волны Россби, в котором полностью

отсутствует влияние фонового течения $c_n = -\frac{\beta}{k^2 + l^2 + a^{-2}}$, и в длинноволновом пределе при $(k^2 + l^2) \ll a^{-2}$, получаем выражение для фазовой скорости:

$$c_n = -\beta a^2. \quad (12)$$

Таким образом, парадокс Россби разрешается следующим образом: нелинейные длинные волны Россби могут существовать, как бы не замечая фонового течения, какой бы величины не достигала скорость фонового потока. Нелинейность в длинноволновом пределе в точности компенсирует влияние доплеровского сдвига. Похожее поведение демонстрируют вихри, развивающиеся на Антарктическом циркумполярном течении [6], а также, например, волны Россби в зоне действия Куро시오.

Интерпретация парадокса Россби для северо-западной части Тихого океана

Сформулируем кратко сказанное в предыдущих пунктах в виде следующих утверждений:

— Для любых линейных волн, в том числе и линейных волн Россби, можно подобрать встречное течение и остановить волну.

— Помимо линейных, есть нелинейные волны Россби, которые сами по себе парадоксальны уже тем, что дисперсионное соотношение нелинейных волн Россби зависит не от амплитуды волны, а только от волнового числа, в то время как нелинейность, как правило, — это зависимость скорости волны от амплитуды (стоксова поправка, солитоны и т. д.).

— Самое парадоксальное заключается в том, что нелинейные волны Россби вырабатывают некий иммунитет к течению (доплеровской поправке) и способны распространяться, не замечая (при длинноволновом приближении) течение вообще. То есть на самом деле, никакое «течение не остановит длинную нелинейную волну Россби». Эта волна его просто не замечает, распространяясь сквозь течения.

Проиллюстрируем это на примере течения Куро시오 с использованием данных спутниковой альтиметрии. Куро시오 — мощное течение северной части Тихого океана, его расход составляет 20—30 Св (1 Св = 10^6 м³/с), у берегов Японии расход может достигать 50 Св. Мгновенные скорости Куро시오 на удалении от берегов Японии изменяются в диапазоне от 0,5 до 1,5 м/с [14—16]. Средние скорости течения, осредненные за период 1993—2018 гг., достигают в основной струе 40 см/с (рис. 1). Разрез по 30° с. ш. проходит южнее основной струи, в то время как разрез по 35° с. ш. проходит вдоль струи Куро시오. Куро시오 является мощным течением северо-западной части Тихого океана. На рис. 1 хорошо видна струя течения, его скорости которого рассчитаны по альтиметрическим данным (ADT, абсолютная динамическая топография). На вкладках рис. 1 также показаны зональные пространственно-временные диаграммы аномалий уровня, построенные для двух широт: 30° и 35° с. ш. На этих разрезах хорошо видно, что изоплеты имеют характерный наклон, демонстрирующий западное распространение волн

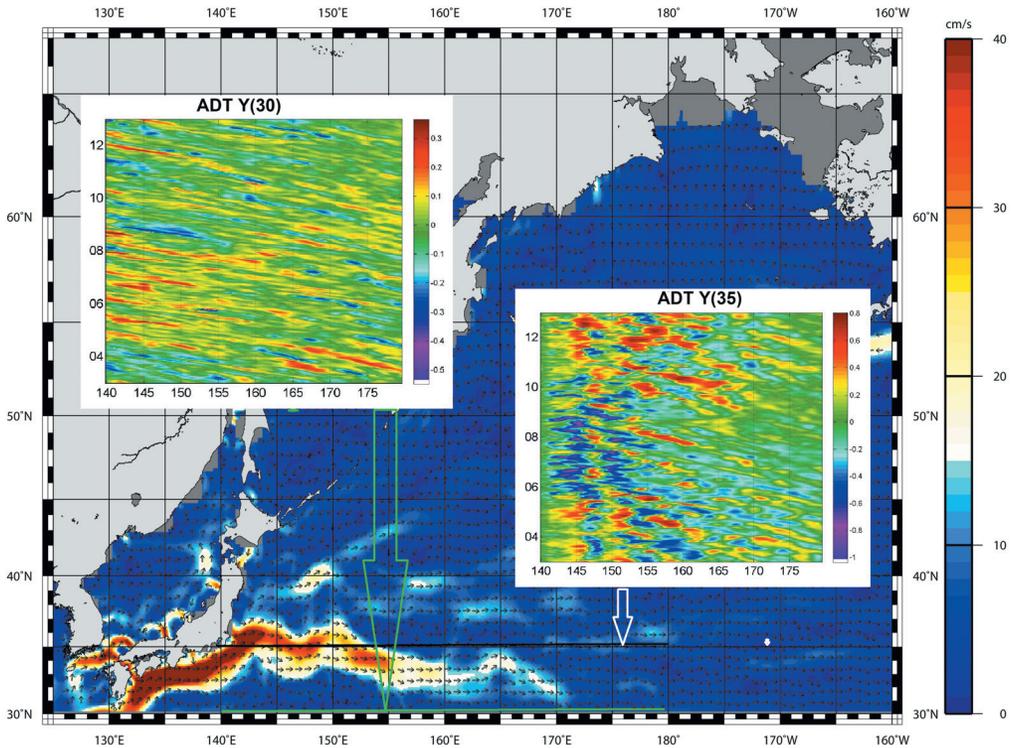


Рис. 1. Средние течения в северо-западной части Тихого океана, рассчитанные по альтиметрическим данным (шкала м/с).

Осреднение за период 1993—2018 гг. На вкладках показаны пространственно-временные диаграммы изменения аномалий уровня океана (м) вдоль 30° и 35° с. ш. (Hovmöller diagrams). Диапазон долгот 140°—180° в. д.

Fig. 1. Mean currents in the northwestern Pacific calculated from altimetry (scales/s). Averaging for the period 1993—2018. The tabs show Hovmöller diagrams of sea level anomalies (m) along 30° and 35° N. The longitude ranges in 140°—180° E.

Россби. Также видно, что волны распространяются практически без дисперсии. Фазовая скорость волн составляет: 5—6 см/с (30° с. ш.) и 3—4 см/с (35° с. ш.) [17]. Известно, что с увеличением широты фазовая скорость волн уменьшается, но увеличивается нелинейность. В работе [18] показано, что если в низких широтах линейная теория может адекватно описывать распространение волн Россби, то широта 30° является критической, севернее которой (в северном полушарии) линейная теория постепенно перестает хорошо работать ввиду нарастания нелинейных процессов и турбулентности. Этот эффект можно также увидеть на вкладках рис. 1 при их сравнении.

На рис. 2 показаны спектры аномалий уровня вдоль рассматриваемых широт. Видно, что для 30° с. ш. энергия волн преимущественно характеризуется первой

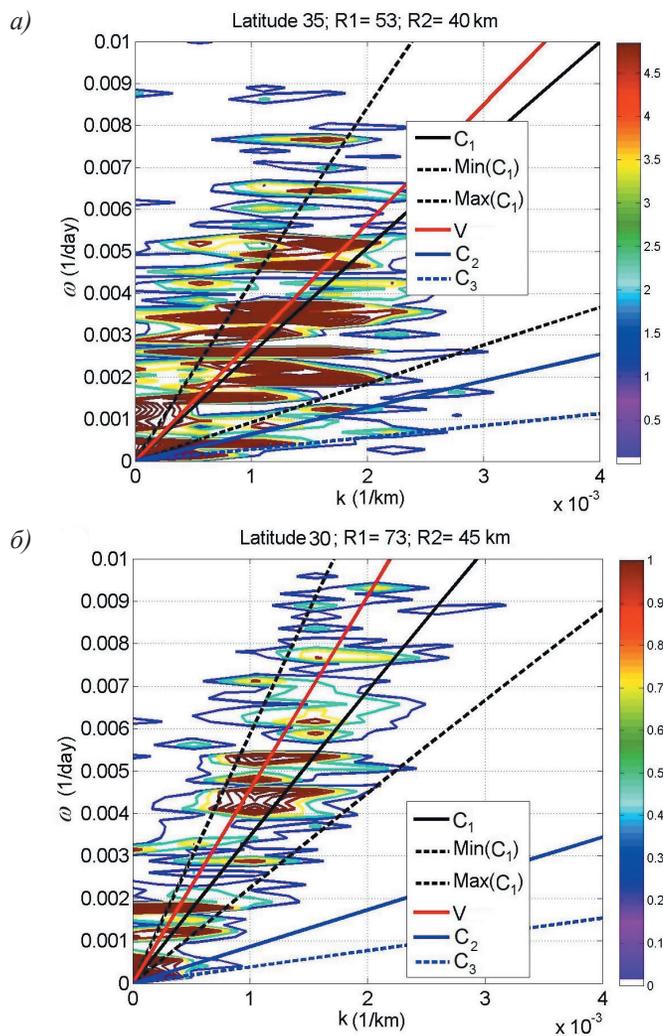


Рис. 2. Графики спектров аномалий уровня (2D-FFT) для 30° и 35° с. ш. По оси абсцисс отложены волновые числа с обратным знаком (ввиду западного распространения волн), по оси ординат — частота. Фазовые скорости волн Россби: V — эмпирическая скорость, рассчитанная по преобразованию Радона (красная линия); теоретические, рассчитанные по длинноволновому приближению $C_n = -\beta a^2$, для первой бароклинной (черная линия), второй и третьей бароклинной моды (синие линии). Черными пунктирами показаны диапазоны изменчивости фазовой скорости $C_1 = -\beta a^2$ (см. также [19]).

Fig. 2. Spectral plots of sea level anomalies η (2D-FFT) for 30° and 35° N. lat. On the x-axis is a wave number with the opposite sign (due to westward of the wave propagation), vertical axis is a frequency. Phase velocities of Rossby waves: V — empirical velocity calculated from the Radon transform (red line); theoretical velocities calculated from the long-wave approximation for the first baroclinic mode (black line) and for the second and third baroclinic modes (blue lines). The black dotted lines show the ranges of phase velocity variability $C_1 = -\beta a^2$ (see also [19]).

модой, в то время как для 35° с. ш. максимумы энергии длинных волн также соответствуют второй и третьей модам. На графике для первой моды показан диапазон изменчивости фазовой скорости, который обусловлен изменчивостью изменения частоты Вяйсаля—Брента по долготе и, соответственно, изменчивостью радиуса деформации, который зависит от частоты Вяйсаля—Брента (рис. 2б). На рисунке также видно, что «эмпирическая» скорость волн V , рассчитанная по альтиметрическим данным с использованием метода Радона, дает большие значения скоростей по сравнению с «теоретическими» скоростями, рассчитанными по длинноволновому дисперсионному соотношению (см. также [19]). Данный факт отмечается во многих публикациях, в частности, в [13, 18], и до сих пор не получил адекватного объяснения.

Отметим, что все расчеты, приведенные на рис. 2, получены без учета течения. Однако, как показано на рис. 1, разрез по 35° с.ш. проходит прямо вдоль стрежня Курошио, которое направлено на восток, т. е. навстречу распространяющимся на запад волнам. И, как показано на соответствующей вкладке рис. 1, это встречное течение не «останавливает» волны, но интенсифицирует их. Мы видим на шкалах этих графиков, что амплитуда волн на 35° с. ш., как минимум, в два раза превышает соответствующую амплитуду волн на 30° с. ш. Также при сравнении графиков видно, что не только изменяется амплитуда с увеличением широты, но также нарушается упорядоченный характер перемещения аномалий, который наблюдается на 30° с. ш. Все это происходит потому, что, во-первых, с увеличением широты увеличивается нелинейность сама по себе [18], а во-вторых, на 35° с. ш. течение оказывает влияние на распространение волн.

Максимумы спектров на 35° с. ш. имеют в несколько раз большие значения и, по сравнению с 30° с. ш., не локализованы, а расположены в широком диапазоне пространственных масштабов. Соответствующие длины волн изменяются от 500 до 1000 и более км. Периоды волн составляют 125—150 и более суток.

Таким образом, рис. 1 и 2 иллюстрируют парадокс Россби: волны не останавливаются встречным течением, скорость которого во много раз превышает скорость самих волн, но интенсифицируются, получая дополнительный источник трансформации за счет нелинейности (второе слагаемое в формуле (11)).

Однако существуют примеры, когда сильное встречное течение может существенно модифицировать рассмотренную выше ситуацию.

Интерпретация парадокса Россби для Антарктического циркумполярного течения

Антарктическое циркумполярное течение — самое мощное течение в Мировом океане. Его расход в различных частях варьируется в диапазоне от 100 до 185 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), а мгновенные скорости могут превышать 1,5 м/с [20]. Сдвиг скорости на зональном струйном течении, каким является Антарктическое циркумполярное течение, может быть сравним с меридиональным изменением параметра Кориолиса β . В этом случае, в длинноволновом приближении нелинейность в точности компенсирует доплеровский сдвиг, вместо β рассматривается $\beta^* = \beta - U''_{yy}$ (рис. 3а), а вместо фазовой скорости c берется c^* , рассчитываемая

в длинноволновом приближении по формуле $c^* = -\beta a^2$ (рис. 3б). На рис. 3 видно, что c^* , как и β^* , могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. В данном случае сдвиговое течение не останавливает волны, но модифицирует их. И снова нелинейность компенсирует дисперсию и доплеровский сдвиг, однако

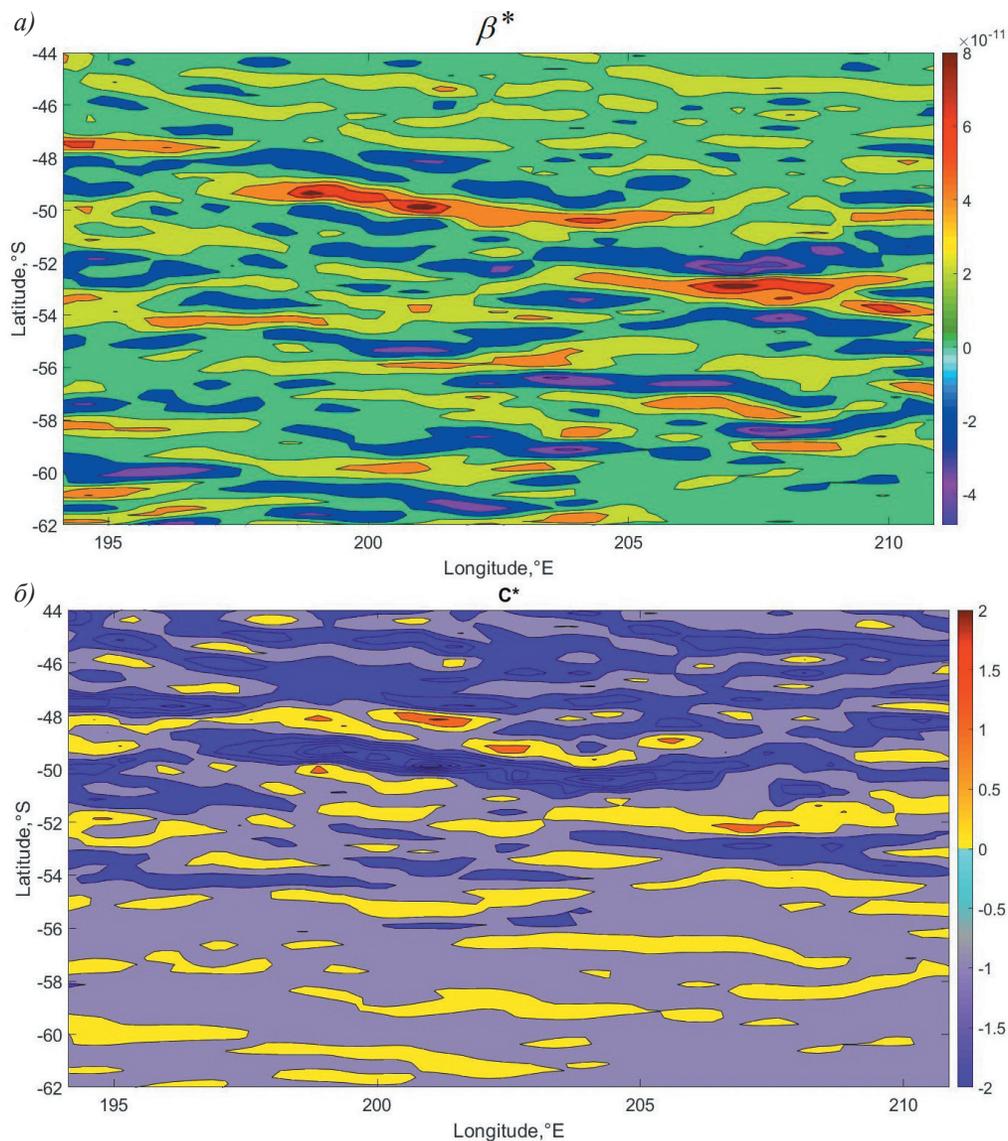


Рис. 3. Пространственное распределение эквивалентного β^* (а) и фазовой скорости c^* (б) в районе Антарктического циркумполярного течения.

Fig. 3. Spatial distribution of the equivalent β^* (a) and phase velocity c^* (b) in the Antarctic Circumpolar Current region.

здесь сдвиг течения и величины U''_{yy} могут превышать значения β . Если $U''_{yy} > 0$, то течение противопоставляется β -эффекту. Если $U''_{yy} < 0$, то сдвиговое течение усиливает β -эффект, и фаза волн получает дополнительную западную составляющую. Подробно этот вопрос изучен в работе [6].

Заключение

Основной вывод данной статьи заключается в том, что нелинейная теория позволяет разрешить основной парадокс, который неизбежно возникает в рамках линейной теории при анализе взаимодействия волн Россби с течением. Линейная теория трактует такое взаимодействие в терминах доплеровского сдвига. При этом возникает противоречие: скорости течения намного превышают фазовые скорости волн, и при таком подходе любое встречное течение способно «остановить» волны Россби. Однако волны Россби не только не «останавливаются» течением, но как бы распространяются на запад сквозь него с присущей им фазовой скоростью, и доплеровская добавка не позволяет их блокировать. Этот парадокс находит свое решение в рамках нелинейной теории, примененной к длинным волнам Россби. Оказывается, нелинейные волны Россби вырабатывают некий иммунитет к течению (доплеровской поправке) и способны распространяться, не замечая постоянное (при длинноволновом приближении) течение вообще. Мы проиллюстрировали это на конкретных примерах с использованием альтиметрических данных. Таким образом, кажущийся парадокс получает простое объяснение, и никакое течение не остановит длинную нелинейную волну Россби.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00066.

Acknowledgments

The research was funded by RFBR, project No 20-05-00066.

Список литературы

1. *Zabusky N.J., Kruskal M.D.* Interactions of “solitons” in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // *Phys. Rev. Lett.* 1965. V. 15. P. 240—243.
2. *Буллаф Р., Кодри Ф.* Солитоны. М.: Мир, 1983. 410 с.
3. *Rossby C.G., et al.* Relation between variations in the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action // *J. Mar. Res.* 1939. V. 2. P. 38—55.
4. *Незлин М.В.* Солитоны Россби // *Успехи физических наук.* 1986. Т. 150, № 1. С. 1—58.
5. *Педлоски Дж.* Гидрофизическая гидродинамика: в 2-х томах. М.: Мир, 1984. Т. 1. 398 с.; Т. 2. 416 с. / Пер. с англ. *Pedlosky J.* *Geophysical Fluid Dynamics.* Berlin: Springer, 1979.
6. *Гневывшев В.Г., Фролова А.В., Кубряков А.А., Собко Ю.В., Белоненко Т.В.* Взаимодействие волн Россби со струйным потоком: основные уравнения и их верификация для антарктического циркумполярного течения // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2019. Т. 55. №. 5. С. 39—50. doi: 10.1134/S0001433819050074.

7. *Bjerknes J.* Die Theorie der außertropischen Zyklonenbildung // *Meteorologische Zeitschrift* 1937. V. 54. P. 462—466.
8. *Rossby C.G.* On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems. II // *J. Mar. Res.* 1938. V. 2. P. 239—263.
9. *Rossby C.G.* Planetary flow patterns in the atmosphere // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1940. V. 66. P. 68—87.
10. *Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане. М.: Мир, 1981. 846 с. / Перевод с англ. Е.Н. Амбарцумян и др. *LeBlond, P.H., Mysak, L.A.* Waves in the Ocean. Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 602 p.
11. *Hughes C.W.* Nonlinear vorticity balance of the Antarctic Circumpolar Current // *J. Geophys. Res.* 2005. 110, C11008. doi: 10.1029/2004JC002753.
12. *Hughes C.W.* The Antarctic Circumpolar Current as a waveguide for Rossby waves // *J. Phys. Oceanogr.* 1995. V. 26 (7). P. 1375—1387.
13. *Chelton, D.B., Schlax, M.G., Samelson, R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* 2011. 91. P. 167—216. doi: 10.1016/j.pcean.2011.01.002.
14. Истоки Ойясио. Монография / Под ред. В.Р. Фукса, А.Н. Мичурина. СПб., 1997. 246 с.
15. *Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О.* Изменчивость уровня Северо-западной части Тихого океана. СПб.: СММО-ПРЕСС. 2009. 309 с.
16. *Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Колдунов В.В., Май П.И., Рубчяня А.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р.* Атлас изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана. СПб.: СММО-ПРЕСС, 2011. 304 с.
17. *Белоненко Т.В.* Наблюдения волн Россби в северо-западной части Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 9. № 3. С. 209—215.
18. *Tulloch R., Marshall J., Smith K.S.* Interpretation of the propagation of surface altimetric observations in terms of planetary waves and geostrophic turbulence // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C02005. doi:10.1029/2008JC005055.
19. *Белоненко Т.В., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Спектральные характеристики волн Россби Северо-западной части Тихого океана // *Исследование Земли из космоса.* 2016. № 1—2. С. 43—52. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-34-43.
20. *Lebedev K.V., Tarakanov R.Yu.* A model study of the wind stress influence on the interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current // *Russ. J. Earth. Sci.,* 2018. 18, ES2002. doi: 10.2205/2017ES000610.

References

1. *Zabusky N.J., Kruskal M.D.* Interactions of “solitons” in a collisionless plasma and the recurrence of initial states. *Phys. Rev. Lett.* 1965, 15: 240—243.
2. *Bullough R.K., Caudrey P.J.* Solitons. Topics in Current Physics. 17. Springer, Berlin, Heidelberg. 1980: 410. doi: 10.1007/978-3-642-81448-8_1.
3. *Rossby C.G., et al.* Relation between variations in the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J. Mar. Res.* 1939, 2: 38—55.
4. *Nezlin M.V.* Rossby solitons. *Phys.-Usp.* 1986, 29 (9): 807—842.
5. *Pedlosky J.* Geophysical Fluid Dynamics. Springer, Berlin. 1979: 624.
6. *Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Kubryakov A.A., Sobko Yu.V., Belonenko T.V.* Interaction of Rossby waves with a jet stream: basic equations and their verification for the Antarctic circumpolar current. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i Okeana.* *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2019. 55, 5: 412—422. [In Russian]. doi: 10.1134/S0001433819050074.
7. *Bjerknes J.* Die Theorie der außertropischen Zyklonenbildung. *Meteorologische Zeitschrift.* 1937, 54: 462—466.
8. *Rossby C.G.* On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems. II. *J. Mar. Res.* 1938, 2: 239—263.
9. *Rossby C.G.* Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1940, 66: 68—87.
10. *LeBlond, P.H., Mysak L.A.* Waves in the Ocean. Elsevier Scientific Publishing Company. 1978: 602.

11. *Hughes C.W.* Nonlinear vorticity balance of the Antarctic Circumpolar Current. *J. Geophys. Res.* 2005, 110: C11008. doi:10.1029/2004JC002753.
12. *Hughes C.W.* The Antarctic Circumpolar Current as a waveguide for Rossby waves. *J. Phys. Oceanogr.* 1995, 26(7): 375—1387.
13. *Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.* 2011, 91, 167—216.
14. *Istojki Ojyasio.* The Origins of the Oyashio / Ed. by V.R. Foux & A.N. Michurin. St. Petersburg, 1997: 246 p. [In Russian].
15. *Belonenko T.V., Koldunov V.V., Staritsyn D.K., Foux V.R., Shilov I.O.* *Izmenchivost' urovnya Severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana.* Variability of sea level of the North-Western part of the Pacific. St. Petersburg: SMIO-PRESS. 2009: 309 p. [In Russian].
16. *Belonenko T.V., Koldunov A.V., Koldunov V.V., May R.I., Rubchenya A.V., Staritsyn D.K., Foux V.R.* *Atlas izmenchivosti urovnya Severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana.* Atlas of level variability in the North-Western part of the Pacific ocean. St. Petersburg: SMIO-PRESS. 2011: 304 p. [In Russian].
17. *Belonenko T.V.* Observations of Rossby waves in the North-Western part of the Pacific ocean. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2012, 9(3): 209—215. [In Russian].
18. *Tulloch R., Marshall J., Smith K.S.* Interpretation of the propagation of surface altimetric observations in terms of planetary waves and geostrophic turbulence. *J. Geophys. Res.* 2009, 114, No C02005. doi: 10.1029/2008JC005055.
19. *Belonenko T.V., Kubrjakov A.A., Stanichny, S.V.* Spectral Characteristics of Rossby Waves in the North-western Pacific based on Satellite Altimetry. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* Exploration of the Earth from space. 2016. 1—2: 43—52. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-34-43.
20. *Lebedev, K.V., Tarakanov R. Yu.* A model study of the wind stress influence on the interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current, *Russ. J. Earth. Sci.*, 2018, 18, ES2002. doi: 10.2205/2017ES000610.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 02.11.2020
Принята к публикации 02.12.2020

Сведения об авторах

Гневывшев Владимир Григорьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, avi9783608@gmail.com.

Белоненко Татьяна Васильевна, д-р геогр. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, btvlisab@yandex.ru.

Information about authors

Vladimir G. Gnevyshev, PhD, Senior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences.

Tatyana V. Belonenko, Grand PhD (Geogr. Sci.), Professor, Saint Petersburg State University.

Некоторые аспекты изменчивости уровня Куршского залива (Юго-Восточная Балтика) при различных синоптических ситуациях

А.В. Килесо^{1,2}, Ж.И. Стонт¹

¹ Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград;
aleksandr.kiles@gmail.com

Комплексный анализ карт приземного давления и гидрометеорологических данных позволил оценить влияние синоптических ситуаций на изменчивость уровня воды в Куршском заливе в штормовых условиях. Выполненное моделирование уровня моря и поля течения при различных направлениях ветра скоростью 5 м/с показало, что в районе мониторинговой станции при ветре северных румбов (315—45°), наблюдается повышение уровня (нагон). Максимальный нагон соответствует сценарию при северо-восточном ветре (45°), минимальный — при северо-западном ветре (315°). Для остальных румбов наблюдается понижение уровня моря (сгон), максимальное при юго-западном ветре (225°). Результаты численного моделирования показали хорошее соответствие с натурными данными.

Ключевые слова: Балтийское море, Куршский залив, уровень моря, моделирование уровня, ветровое воздействие, понижение уровня, повышение уровня.

Some aspects of the water level variability of the Curonian Lagoon (South-Eastern Baltic) under various synoptic situations

A.V. Kiles^{1,2}, Zh.I. Stont¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
aleksandr.kiles@gmail.com

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Climate change in the Kaliningrad Region is expressed in terms of extreme events. The water level changes and storm events strongly affect the Curonian Spit (southeastern Baltic Sea). The purpose of the work is to analyze the feedback of the southeastern Curonian Lagoon on the various synoptic situations using water level and surface wind data obtained from a monitoring station. Numerical modeling of water level and surface current field in the Curonian Lagoon has been performed using the finite element program SHYFEM developed at the Institute of Marine Sciences — National Research Council. Analysis of the real data has shown that the prevailing anticyclonic conditions with prevailing southerly storm winds caused a significant decrease in the water level in April 2019, which, together with a decrease in river runoff due to a lack of precipitation, caused a significant decrease in the water level of the Curonian Lagoon. Numerical modeling for different wind scenarios has shown that northerly winds (5 m/s and 315—45° direction) increase the water level at the monitoring station point. The maximum surge corresponds to the scenario with a northeasterly wind (45°) and reaches values of 3.5 cm. The minimum increase in the level has been observed for a northwesterly wind (315°) reaching values of 0.8 cm. The maximum velocities of currents have been noted for the southerly and northerly winds and

are 8.7 cm/s and 8.6 cm/s, respectively. Westerly and easterly winds form currents with the minimum speed of 3.6 cm/s and 3.7 cm/s, respectively.

Keywords: Baltic Sea, Curonian Lagoon, sea level, level modeling, wind impact, level decrease, level rise.

For citation: *A.V. Kileso, Zh.I. Stoit.* Some aspects of the water level variability of the Curonian Lagoon (South-Eastern Baltic) under various synoptic situations. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydro-meteorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 61: 494—506. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-494-506

Введение

Климатические изменения на региональном уровне выражаются в виде экстремальных явлений. Географическое положение Куршской косы, которая разделяет солоноватые воды Балтийского моря и пресные воды Куршской лагуны, делает ее особенно уязвимой к их воздействию. Краткосрочная изменчивость уровня моря, являющаяся результатом воздействия гидрометеорологических процессов, наиболее сильно влияет на прибрежную зону как со стороны моря, так и со стороны залива. Высокий уровень может увеличивать интенсивность штормовых нагонов, разрушительных для береговой зоны.

Климатические изменения могут стать причиной сокращения биоразнообразия, ухудшения качества вод, усиления эвтрофикации, вызвать необратимые изменения в экосистемах Куршского залива. Исследования сезонной и межгодовой изменчивости уровня на акватории Куршского залива Балтийского моря по данным прибрежных мареографов необходимы для оценки воздействия на окружающую среду при проведении региональных климатических исследований. Верификация результатов моделирования с натурными данными, использование современного оборудования и методов обработки позволят сопоставить результат с результатами для других частей Куршского залива Балтийского моря.

Вопросами изменчивости уровня и течениями Куршского залива занимались многие авторы, особенно литовские коллеги [1—5]. Впервые измерения течений воды в Куршском заливе с помощью ветряных мельниц начал Шмидт-Рис (Schmidt-Ries) в 1932 г. [1]. В дальнейшем было установлено, что под влиянием слабого восточного ветра верхний слой воды в южной части Куршского залива движется с юго-востока на северо-запад [6]. В середине XX века течения в Куршском заливе были изучены путем построения модели, связанной с топографией залива [7]. В результирующей схеме течений показано появление циклонической циркуляции в центральной и южной частях залива, возникающей из-за стока рек Дейма и Гиляя.

Моделирование течений в Куршском заливе во время штормовых ситуаций рассмотрено в [8]. Оперативная глобальная гидродинамическая модель NIROMB показала удовлетворительные результаты для Литвы [9]. Отдельные недостатки модели авторы связывали с необходимостью устранения влияния Куршской косы на западные ветры. Типичные закономерности развития течений под влиянием ветра основных восьми румбов были смоделированы с помощью

2D гидродинамической модели [4]. Представлены оценки водообмена между двумя противоположными частями Куршского залива с учетом влияния водообмена через Клайпедский пролив. Это исследование показало возникновение двуцентральной циркуляции в южной части Куршского залива под влиянием северо-западного и юго-восточного, а также южного и северного ветра. Основным недостатком этой модели заключался в том, что сток рек не учитывался.

Для численных экспериментов гидродинамическая модель, разработанная в Федеральном морском и гидрографическом агентстве Германии (BSH), была адаптирована к литовскому побережью [1, 10]. Течения смоделированы для ветра скоростью 5 и 10 м/с по основным восьми румбам; особое внимание уделено наиболее вероятным направлениям для побережья Литвы (западный, юго-западный и юго-восточный ветер). С помощью модели проанализированы закономерности циркуляции в литовских водах и дана оценка влияния реки Нямунас (Неман) на распределение загрязнения. Приведены четыре ситуации формирования течений в северной и южной частях лагуны при различных направлениях ветра. Получено, что в южной части залива при любом направлении ветра, кроме восточного и западного, развивается циркуляция в двух направлениях, причем наибольшего развития она достигает в случае юго-восточного и северо-западного направления ветра. Схема течений в изученной части Куршского залива соответствует топографии лагуны. Моделирование циркуляции на юго-востоке южной части даже после включения рек Дейма и Гилия не дало сопоставимых распределений течений.

Цель работы — на основе данных об уровне моря, получаемых с уровнемера, установленного на заливном берегу Куршской косы, проследить отклик вод юго-западной части лагуны на различные синоптические ситуации.

Материалы и методы

Для анализа динамики уровня заливного побережья российской части Куршской косы использовались данные, полученные с автоматического самописца уровня и волнения компании General Acoustics Log_aLevel, установленного в музейном комплексе НП «Куршская коса» (берег залива) (рис. 1). Данные приведены к Балтийской системе высот (см, БС) измерения уровня. Детальность записей позволяет отслеживать изменения уровня с заданной дискретностью.

Для комплексного мониторинга использовались метеорологические данные, полученные в районе установки мареографа с автоматической метеостанции, расположенной на расстоянии 200 м от уровнемера на заливной части Куршской косы. Синоптическая обстановка оценивалась по картам приземного давления метеоцентра Бракнелл (<https://www.metoffice.gov.uk/>).

Моделирование уровня моря и поля течений в Куршском заливе (Балтийское море) выполнено с использованием гидродинамической модели SHYFEM [11]. Данная модель основана на уравнениях мелкой воды как в двумерной, так и в трехмерной постановке.

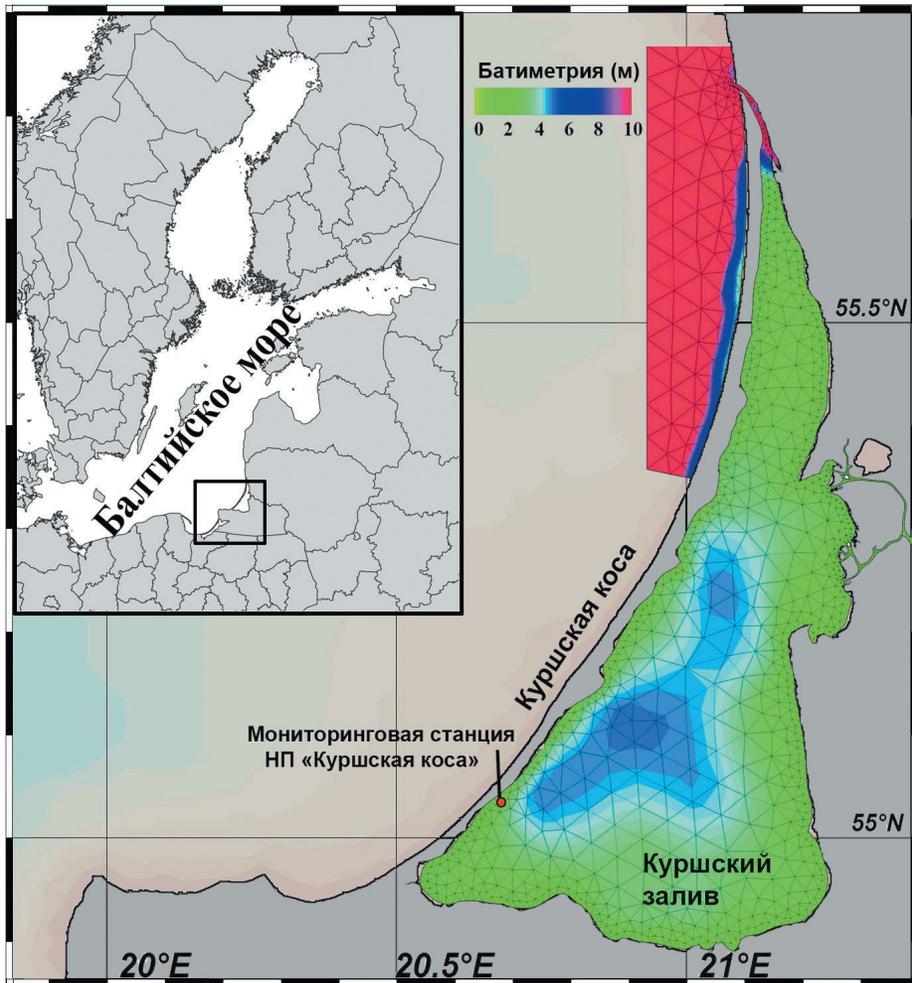


Рис. 1. Куршский залив. Район исследования и схема модельного пространства.

Fig. 1. The Curonian Lagoon. Study area and numerical grid of the model.

Результаты исследований

Рассмотрим несколько типичных ситуаций сгона — нагона в районе установки автоматического самописца уровня и волнения в музейном комплексе НП «Куршская коса» (берег залива) (см. рис. 1).

1. Влияние синоптических ситуаций на уровень воды

Апрель—май 2019 г.

В апреле 2019 г. в регионе господствовали антициклонические условия. Преобладающие ветры южных румбов вызвали сгон воды в районе музейного комплекса. По данным уровнемера, установленного в НП «Куршская коса», наблюдался спад уровня с суточной интенсивностью до 15 см. Метеостанции, расположенные

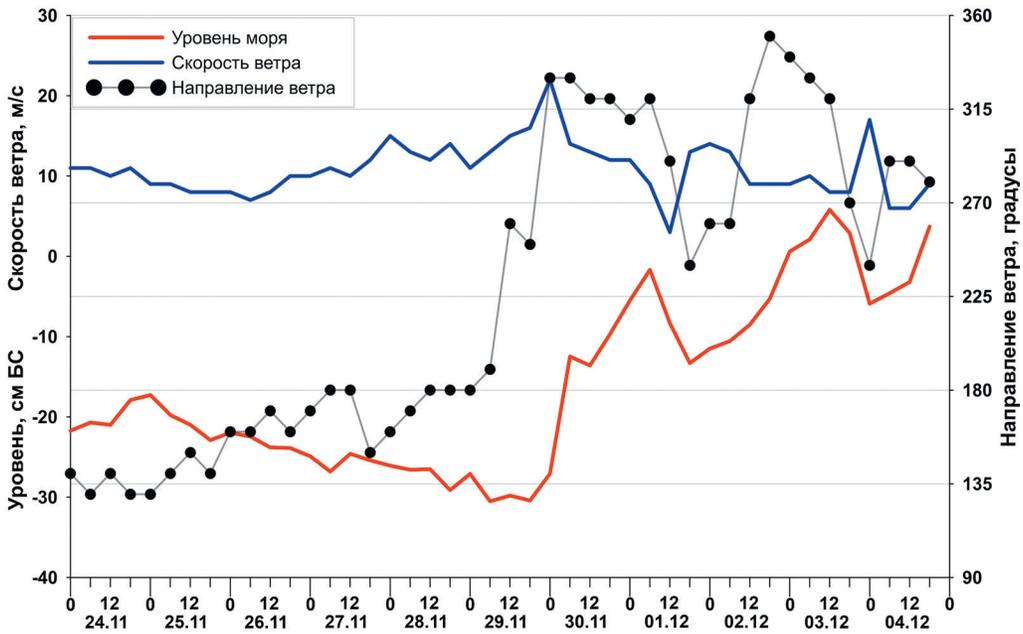


Рис. 3. Ход уровня моря при изменении характеристик ветра в ноябре—декабре 2019 г. на заливной стороне Куршской косы.

Fig. 3. The water level variation under wind characteristics changes in November—December 2019 at the monitoring station in the Curonian Lagoon.

Ноябрь 2019 г.

Ноябрь считается одним из самых ветреных месяцев для Юго-Восточной Балтики с преобладанием ветра западных румбов. К концу месяца уменьшается повторяемость чисто западного ветра и увеличивается повторяемость ветра юго-восточного румба.

Большую часть последней декады ноября 2019 г. погода Юго-Восточной Балтики формировалась под воздействием далекого холодного антициклона с центром (1050 гПа) над Средней Волгой. Преобладал ветер преимущественно южных румбов (ЮВ, Ю) скоростью до 12 м/с. При сгонных ветрах уровень постепенно понизился от –20 до –30 см БС. 28—30 ноября Юго-Восточная Балтика оказалась под влиянием атлантического циклона глубиной 985 гПа, который смещался на северо-восток. При прохождении фронтов, связанных с этим циклоном, ветер зашел к северным румбам и усилился до 22 м/с, что вызвало нагон воды. Затем ветер отошел к западу, что способствовало понижению уровня воды. Распространение влияния северной периферии антициклона с устойчивым северо-западным ветром способствовало нагону вод (рис. 3).

Март 2020 г.

В начале марта 2020 г. неглубокие атлантические циклоны смещались через Балтийское море на северо-восток. 12 марта глубокий волновой циклон и

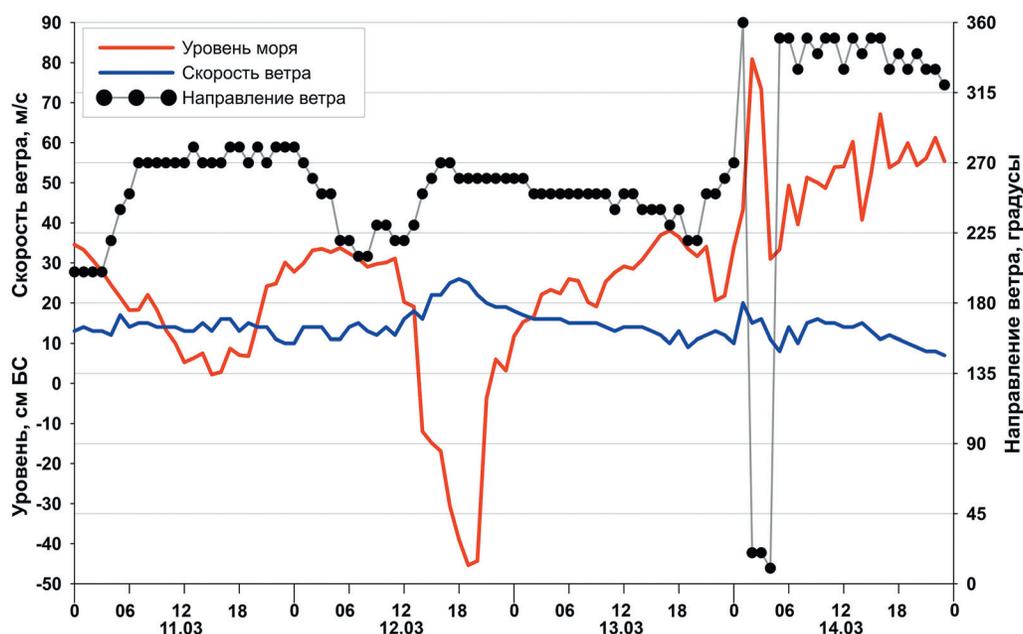


Рис. 4. Ход уровня моря при изменении характеристик ветра в марте 2020 г. на заливной стороне Куршской косы.

Fig. 4. The water level variation under wind characteristics changes in March 2020 at the monitoring station in the Curonian Lagoon.

связанный с ним холодный фронт вызвали усиление порывистого западного ветра до штормового 26 м/с, причиной которого стал значительный градиент давления. Уровень, колебавшийся около +40 см, резко упал ниже ординара (–40 см БС). Произошел сгон воды, который обнажил дно. При уменьшении скорости ветра значения уровня восстановились. Через сутки ветер зашел к северным румбам и усилился, наблюдался резкий нагон воды, уровень повысился до +80 см БС (рис. 4). За двое суток амплитуда уровня составила 120 см.

2. Моделирование уровня моря и поля течения в Куршском заливе

Целью численного моделирования является исследование зависимости возникновения сгонно-нагонных явлений в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса» от направления ветра.

Модельное пространство представляет собой район Юго-Восточной Балтики — Куршский залив, в прибрежной части которого со стороны косы располагается мониторинговая станция НП «Куршская коса» с координатами 55,03° с. ш., 20,65° в. д. (рис. 1). Для более подробного учета особенностей береговой линии и подводного рельефа использовалась неравномерная сетка из треугольных элементов. В качестве батиметрических данных использовались открытые данные навигационных карт. Для описания вертикальной структуры модельного пространства

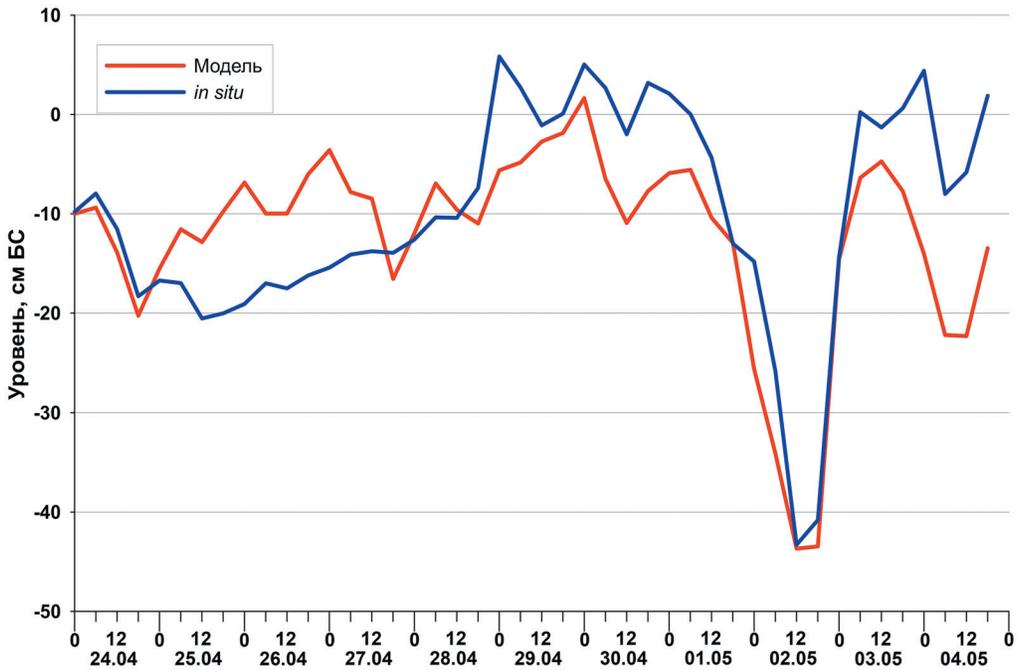


Рис. 5. Результаты калибровки численной модели на реальных данных об уровне моря в период с 24 апреля по 5 мая 2019 г.

Fig. 5. Results of model calibration using real water level data from April 24 to May 5, 2019.

использовалось пять сигма-слоев, причем толщина слоев зависит от глубины, т. е. чем больше глубина, тем больше шаг по вертикали между слоями.

На первом этапе была выполнена калибровка основных параметров численной модели, в частности коэффициента трения ветра о водную поверхность и трения воды о дно. Для этого было выполнено моделирование реальной штормовой ситуации, которая наблюдалась в период с 24 апреля по 5 мая 2019 г. (см. рис. 2). В результате калибровки получено хорошее соответствие модельного и реального уровня моря в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса» (рис. 5). Величина значимого при $\alpha = 0,05$ коэффициента корреляции составила 0,73. Отмечается практически синхронная реакция на ветровое воздействие.

Стоит отметить, что в период с 28 апреля по 2 мая при северном нагонном ветре модель несколько занижала максимальные значения уровня, полученные с помощью уровнемера. В период с 24 по 27 апреля при юго-восточном и восточном ветре, когда уровнемер фиксировал падение уровня моря ниже ординара, наоборот, отмечается завышение модельных значений уровня. Максимальная разность между измеренными и модельными значениями достигала 10 см. Данный факт, по-видимому, объясняется тем, что в модельном пространстве ветер задавался однородным над всей областью Куршского залива, шаг по времени в данных о ветре

составлял 6 ч. Таким образом, неоднородность пространственного распределения ветра над Куршским заливом, а также достаточно грубый шаг по времени оказывают свое влияние на результаты численного моделирования.

Для исследования изменчивости уровня в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса» в численных расчетах были реализованы следующие сценарии ветрового воздействия. Моделирование было проведено для ветра основных румбов с шагом 45° : северный (0°), северо-западный (315°), западный (270°), юго-западный (225°), южный (180°), юго-восточный (135°), восточный (90°), северо-восточный (45°); скорость ветра 5 м/с (умеренный). По данным сайта *Расписание погоды* (<http://www.rp5.ru>) средняя скорость ветра за 2009—2019 гг. в пос. Нида (берег Куршского залива, см. рис. 1) составляет 4 м/с, преобладающее направление — от западных румбов.

Расчетный период для каждого сценария составлял пять условных дней. Водная среда считалась баротропной. Начальный уровень моря во всем модельном пространстве формально задавался равным 0 м. Также не задавались граничные условия в Балтийском море и на реках, втекающих в Куршский залив. Это сделано для того, чтобы оценить только вклад ветра в изменение уровня моря и скорости течений.

Во всех модельных сценариях спустя 60 расчетных часов значения уровня моря и поля течения выходят на некоторый стационарный уровень (рис. 6). Для расчетных сценариев с ветром северным (0°), северо-восточным (45°), восточным (90°) и северо-западным (315°) наблюдается увеличение уровня в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса». Максимальный нагон соответствует сценарию с северо-восточным ветром (45°) и достигает значений 3,5 см. Минимальный нагон характерен для северо-западного ветра (315°) и равен 1 см. В оставшихся сценариях наблюдается понижение уровня моря. Максимальный сгон воды из района мониторинговой станции фиксируется при юго-западном ветре (225°), понижение уровня моря при этом составляет 3,5 см.

Скорость течений, которые формируются в районе мониторинговой станции, также напрямую зависят от ветра. Максимальные значения скорости течений отмечаются при южном (8,7 м/с) и северном (8,6 см/с) ветре. Скорость течений минимальна при восточном (3,6 м/с) и западном (3,7 см/с) ветре.

Численное моделирование показало, что повышение уровня моря (нагон) наблюдается при ветре с северной составляющей. При этом максимальный нагон воды формируется при северо-восточном ветре. Понижение уровня и максимальный сгон отмечены при юго-западном ветре. Под воздействием умеренного ветра (5 м/с) южного направления формируются течения, скорость которых может достигать 9 см/с. Минимальная скорость течений наблюдается при восточном и западном ветре.

Выводы

Выполненный анализ данных изменчивости уровня моря, полученных с помощью уровнемера, установленного в музейном комплексе НП «Куршская

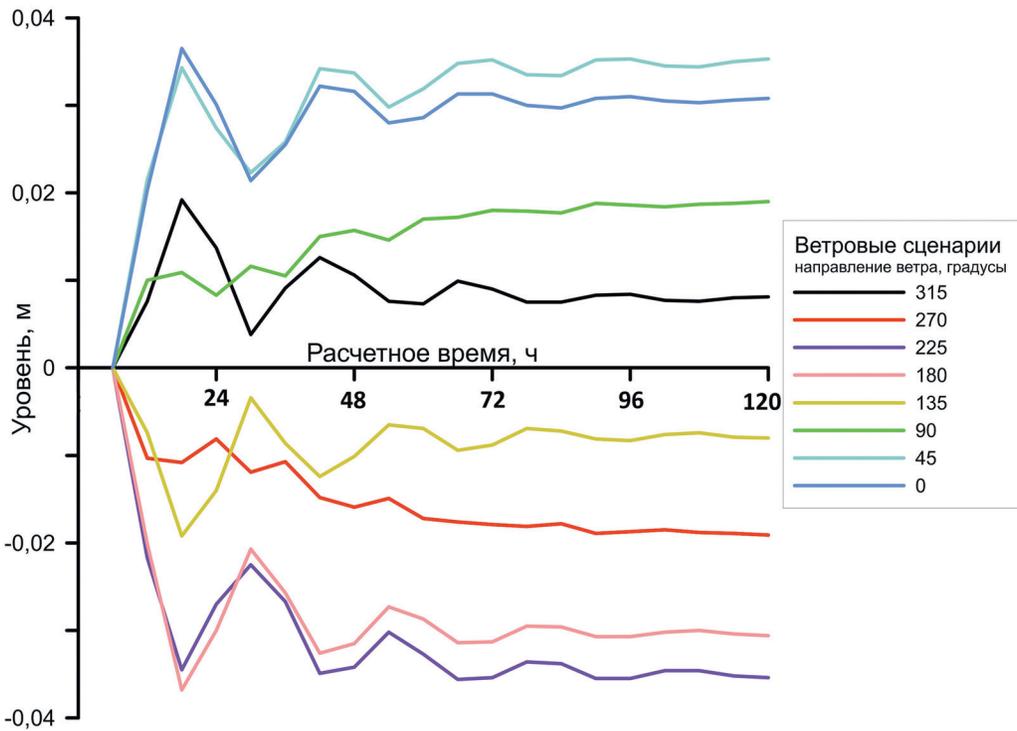


Рис. 6. Изменение уровня моря в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса» ($55,03^{\circ}$ с.ш., $20,65^{\circ}$ в.д.) для различных расчетных сценариев.

Fig. 6. Modeled water level values at the monitoring station in the Curonian Lagoon (55.03° N, 20.65° E) for various model scenarios.

коса» (залив), в зависимости от синоптической ситуации в районе показал следующее:

— господство антициклонических условий с преобладанием ветра южных румбов явилось причиной значительного понижения уровня воды в апреле 2019 г., что в совокупности с уменьшением стока рек из-за дефицита осадков вызвало значительное понижение уровня воды Куршского залива;

— штормовой ветер западных румбов (особенно юго-западный) вызывает сгон воды и резкое понижение уровня; при уменьшении скорости ветра уровень быстро возвращается к прежним значениям;

— штормовой ветер северных румбов (особенно северо-восточный) вызывает нагон воды и повышение уровня.

Численное моделирование показало следующие особенности ветрового воздействия на уровень моря и поле течений в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса»:

— повышение уровня и максимальный нагон наблюдаются при ветре северных румбов; максимальный нагон воды формируется при северо-восточном ветре;

— понижение уровня и максимальный сгон отмечаются при юго-западном ветре;

— под воздействием умеренного ветра (5 м/с) южного направления формируются течения, скорость которых может достигать 9 см/с; минимальная скорость течений наблюдается при восточном и западном ветре.

Хорошее соответствие экспериментальных и модельных данных свидетельствует о сопоставимости результатов проведенного моделирования с существующими схемами течений в других частях Куршского залива, особенно в его южной части.

Благодарности

Анализ метеорологических характеристик выполнен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калининградской области (грант № 19-45-390012). Моделирование выполнено в рамках государственного задания ИО РАН № 0149-2019-0013.

Acknowledgments

The analysis of meteorological characteristics was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Kaliningrad Region (Grant No. 19-45-390012). The modeling was carried out within the framework of the state task of the IO RAS No. 0149-2019-0013.

Список литературы

1. Davulienė L., Trinkūnas G. Circulation dynamics in the Curonian Lagoon waters Lithuanian // Lithuanian J. Physics. 2004. V. 44. P. 67—73.
2. Ferrarin C., Razinkovas A., Gulbinskas S., Umgiesser G., Bliudziute L. Hydraulic regime-based zonation scheme of the Curonian Lagoon // Hydrobiologia. 2008. V. 611. P. 133—146.
3. Neumann T., Eilola K., Gustafsson B., Müller-Karulis B., Kuznetsov I., Meier H.E.M., Savchuk O.P. Extremes of temperature, oxygen and blooms in the Baltic Sea in a changing climate // AMBIO. 2012. V. 41. P. 574—585.
4. Raudsepp U., Kouts T. Wind driven circulation the Curonian Lagoon // Environmental and Chemical Physics. 2002. V. 24 (3). P. 151—155.
5. Zemlys P., Ferrarin C., Umgiesser G., Gulbinskas S., Bellafore D. Investigation of saline water intrusions into the Curonian Lagoon (Lithuania) and two-layer flow in the Klaipėda Strait using finite element hydrodynamic model // Ocean Science. Discussion. 2013 (10). P. 321—352.
6. Červinskas E. On the currents in the Curonian Lagoon // Scientific Publications of the Lithuanian High Schools: Geography and Geology (Vilnius). 1966 (4). P. 23—38.
7. Červinskas E. The main features of the hydrological regime / In: Curonian Lagoon, Results of the Complex Investigation. Vilnius, Institute of Biology, 1959. P. 47—67.
8. Чубаренко Б.В., Чубаренко И.П. Моделирование поля течений в Куршском заливе при штормовых ветровых воздействиях // Метеорология и гидрология. 1995. № 5. С. 83—89.
9. Zemlys P., Dailidienė I., Zaboras J. An operational model for Lithuania's coastal zone // Baltica. 2013. V. 26 (1). P. 115—120.
10. Davulienė L., Dailidienė I., Dick S., Trinkūnas G., Valkūnas L. Validation of the circulation model for Lithuanian coastal waters // J. Environ. Chem. Phys. 2002. 24 (4). P. 226—231.

11. *Umgiesser G., Canu D., Cucco A., Solidoro C.* A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation // *J. Marine Systems*. 2004. V. 51. Is. 1—4. P. 123-145.
12. *Стоит Ж.И., Чуринов Д.А., Ульянова М.О.* Влияние метеопараметров на изменчивость уровня моря в Куршском заливе в 2017 г. / В сб.: Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса». Вып. 14 / Сост. И.П. Жуковская. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 127—135.
13. *Стоит Ж.И., Чуринов Д.А., Ульянова М.О.* Динамика уровня моря на морском и лагунном побережье Куршской косы во время чрезвычайных ситуаций / В сб.: Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса». Вып. 15 / Сост. И.П. Жуковская. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2019. С. 183—194.

References

1. *Davulienė L., Trinkūnas G.* Circulation dynamics in the Curonian Lagoon waters Lithuanian. Lithuanian Journal of Physics. 2004, 44: 67—73.
2. *Ferrarin C., Razinkovas A., Gulbinskas S., Umgiesser G., Bliudziute L.* Hydraulic regime-based zonation scheme of the Curonian Lagoon. *Hydrobiologia*. 2008, 611: 133—146.
3. *Neumann T., Eilola K., Gustafsson B., Müller-Karulis B., Kuznetsov I., Meier H.E.M., Savchuk O.P.* Extremes of temperature, oxygen and blooms in the Baltic Sea in a changing climate. *Ambio*. 2012, 41: 574—585.
4. *Raudsepp U., Kouts T.* Wind driven circulation the Curonian Lagoon. *Environmental and Chemical Physics*. 2002, 24 (3): 151—155.
5. *Zemlys P., Ferrarin C., Umgiesser G., Gulbinskas S., Bellafore D.* Investigation of saline water intrusions into the Curonian Lagoon (Lithuania) and two-layer flow in the Klaipėda Strait using finite element hydrodynamic model. *Ocean Science. Discussion*. 2013, 10: 321—352.
6. *Červinskas E.* On the currents in the Curonian Lagoon. *Scientific Publications of the Lithuanian High Schools: Geography and Geology (Vilnius)*. 1966, 4: 23—38.
7. *Červinskas E.* The main features of the hydrological regime. *Curonian Lagoon, Results of the Complex Investigation*. Vilnius, Institute of Biology, 1959: 47—67.
8. *Chubarenko B.V., Chubarenko I.P.* Modelling of currents in the Curonian Lagoon during storm wind influence. *Meteorologiya i gidrologiya*. *Meteorology and Hydrology*. 1995, 5: 54—60. [In Russian].
9. *Zemlys P., Dailidienė I., Zaboras J.* An operational model for Lithuania's coastal zone. *Baltica*. 2013, 26 (1): 115—120.
10. *Davulienė L., Dailidienė I., Dick S., Trinkūnas G., Valkūnas L.* Validation of the circulation model for Lithuanian coastal waters. *Journal Environ. Chem. Phys*. 2002, 24 (4): 226—231.
11. *Umgiesser G., Canu D., Cucco A., Solidoro C.* A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems*. 2004, 51 (1—4): 123—145.
12. *Stoit Zh.I., Churin D.A., Ulyanova M.O.* Influence of meteorological parameters on sea level variability in the Curonian Lagoon in 2017. *Problemy izucheniia i okhrany prirodnogo i kul'turnogo naslediiia natsional'nogo parka «Kurshskaia kosa»*. Problems of studying and protecting the natural and cultural heritage of the Curonian Spit National Park: collection of scientific articles. Issue 14. Kaliningrad: Izd-vo BФU im. I. Kanta. 2018: 127—135. [In Russian].
13. *Stoit Zh.I., Churin D.A., Ulyanova M.O.* Dynamics of sea level on the sea and lagoon coast of the Curonian Spit during emergency situations. *Problemy izucheniia i okhrany prirodnogo i kul'turnogo naslediiia natsional'nogo parka «Kurshskaia kosa»*. Problems of studying and protecting the natural and cultural heritage of the Curonian Spit National Park: collection of scientific articles. Issue 15. Kaliningrad: Izd-vo BФU im. I. Kanta. 2019: 183—194. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.08.2020

Принята после доработки к публикации 05.11.2020

Сведения об авторах

Килесо Александр Владимирович, младший научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, старший преподаватель Балтийского федерального университета им. И. Канта, aleksandr.kiles@gmail.com.

Стонт Жанна Ивановна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ocean_stont@mail.ru.

Information about authors

Kiles Alexander V., Junior Researcher; Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Senior Lecturer, Immanuel Kant Baltic Federal University.

Stont Zhanna I., PhD (Geogr. Sci.), Senior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences.

УДК 628.4.03/.04

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-507-520

Раздельное накопление и сбор отходов: перспективы и возможности

Д.А. Лебедев¹, А.А. Никанорова²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Научно-проектная организация «МЕГАПОЛИС», Санкт-Петербург, eco@themegapolis.com

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, a.a.nikanorova@gmail.com

Изучены перспективы внедрения раздельного накопления отходов как производства, так и потребления на местах их первичного накопления и образования с учетом современных технологических подходов и экологической политики в Российской Федерации. Определены 12 потоков потенциальных вторичных материальных ресурсов (требующих индивидуального подхода при накоплении, сборе, транспортировке) в составе твердых коммунальных отходов от населения, и 29 потоков отходов и компонентов с указанием возможности и перспектив их переработки, получения вторичного сырья и продукции. Показана необходимость внедрения системы рационального обращения с отходами на предприятии, учреждении, товариществом собственников жилья (недвижимости), с учетом всех требований действующего законодательства и особенностей производственного цикла.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы (ТКО), вторичное сырье, вторичные материальные ресурсы (ВМР), раздельное накопление отходов (РНО), генеральная схема санитарной очистки (ГССО).

Separate waste accumulation and collection: prospects and opportunities

D.A. Lebedev¹, A.A. Nikanorova²

¹ Science and engineering company “MEGAPOLIS” Ltd., Saint Petersburg, Russia

² Scientific Research Centre for Ecological Safety of Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

The purpose of this investigation is to study the prospects for introducing separate waste accumulation of both production and consumption at the places of their primary accumulation and formation, taking into account modern technological approaches, and environmental policy in the Russian Federation.

The goals and objectives for increasing the shares of MSW aimed at processing and disposal are determined by the state. According to various estimates, the use of separate accumulation and collection of all types of waste at the places of their primary accumulation, including at container sites, is effective. The morphological composition of MSW is relatively predictable; the main mass fraction is food waste — up

to 27 %, paper — up to 21 %, polymers — up to 19 %, etc. The composition of waste from enterprises depends on their activities.

The participants in the waste management system in the Russian Federation were conditionally divided into three main groups according to key roles and responsibilities in accordance with federal requirements for the waste management system: 1 — waste owners and consumers of waste management services; 2 — performers of waste management services (operators and regional operators); 3 — control and oversight bodies and executive authorities at various levels (municipal, regional, federal).

12 streams of potential secondary material resources (requiring an individual approach in the accumulation, collection, transportation) of MSW from the population, and 29 streams of waste and components with the possibility and prospects of their processing, obtaining secondary raw materials and products were identified. Wastes not related to MSW can be accumulated not only at container sites, with the mandatory consideration of sanitary norms and rules. Even with the separate accumulation of MSW, new waste streams and SRM can be generated, which are classified in hazard classes III—V. The recommended frequency of export of MSW components during the implementation of separate accumulation and collection of waste, which does not contradict the requirements of sanitary standards, is determined.

The procedure and stages for the centralized introduction of separate accumulation and collection of waste from the population, justification of waste streams and components, the frequency of their removal in the municipality, settlements, horticultural non-profit partnership, etc. are defined and approved in the «General schemes for sanitary cleaning». The introduction of a system of rational waste management at an enterprise, institution, partnership of homeowners (real estate), taking into account all the requirements of the current legislation and the features of the production cycle, is recommended after the development of an environmentally and economically sound «Program for the implementation of separate collection and accumulation of waste».

Keywords: municipal solid waste (MSW), secondary raw materials, secondary material resources (SMR), selective waste accumulation (SWA), general schemes for sanitary cleaning (GSSC).

For citation: *D.A. Lebedev, A.A. Nikanorova. Separate waste accumulation and collection: prospects and opportunities. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2020, 61: 507—520. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-507-520*

Введение

Тема извлечения компонентов отходов, полезных с точки зрения переработки для получения новых товаров, очень актуальная и регулярно освещается в разных источниках средств массовой информации. Стратегическими целями государства в области экологической безопасности являются сокращение количества отходов, поступающих на размещение, и максимальное использование полезных составляющих отходов для изготовления вторичного сырья.

В настоящее время в стадии реализации находится национальный проект «Экология» и его программы «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами», «Чистая страна» (сроки реализации 01.10.2018—31.12.2024) [1]. В ближнесрочной перспективе установлены целевые показатели для утилизации, обработки отходов. Современные технические разработки охватывают широкий спектр операций обработки, утилизации и обезвреживания отходов всех видов и классов опасности. Изучением методов сортировки отходов потребления занимаются российские и зарубежные специалисты и ученые в последние десятилетия. Наиболее эффективным по проценту сортировки от объема образования отходов считается сбор отходов покомпонентно в разные

контейнеры — до 65 %, сбор компонентов через пункты вторичного сбора отходов — 10 %, производственный потенциал мусоросортировочных станций — до 50 % [2—11]. Внедрение раздельного накопления и сбора отходов актуально в связи со стратегическими целями государства по снижению количества отходов, поступающих на размещение и захоронение на полигонах.

Целью данного исследования является изучение перспектив внедрения раздельного накопления отходов (далее РНО) как производства, так и потребления на местах их первичного накопления и образования с учетом современных технологических подходов и экологической политики Российской Федерации.

Материалы и методы

В «Основах государственной политики в области экологического развития Российской Федерации» (Указ Президента РФ от 30.04.2012) определены основные цели и механизмы в области экологического развития. При решении вопросов выбора безопасного обращения с отходами рекомендуется максимально использовать образовавшиеся отходы путем переработки, регенерации, рекуперации и рециклинга. В период с 2014 по 2020 г. в Федеральный закон от 10.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (далее № 89-ФЗ) были внесены важные изменения. Согласно ст. 12 № 89-ФЗ в рамках Распоряжения Правительства РФ от 25 июля 2017 г. № 1589-р «Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается» утвержден перечень видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается. В начале 2018 г. Правительством РФ была утверждена Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. Среди основных целей этой стратегии обозначена минимизация количества отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, с применением мирового принципа «предотвращение образования отходов — повторное использование — переработка во вторичные ресурсы» и многое другое. Указом Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» определены 12 ключевых направлений, по которым разработаны национальные проекты. 11 февраля 2019 г. опубликован паспорт национального проекта «Экология». Задачей этого проекта является увеличение долей ТКО, направленных на обработку и утилизацию. Соответствующие целевые показатели приведены на рисунке 1 [1]; они были откорректированы и несколько отличаются от разработанных ранее в 2018 г.

С 1 января 2020 г. в № 89-ФЗ введено новое понятие «энергетическая утилизация», которое подразумевает использование ТКО в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки. При *утилизации* отходов производства и потребления применимы технологии на основе механических, физико-химических, термических, биологических методов. Технологически выделение



Рис. 1. Целевые показатели обработки и утилизации твердых коммунальных отходов в РФ, определенные в рамках Национального проекта «Экология».

Fig. 1. Municipal solid waste treatment and disposal targets in the Russian Federation, defined in the framework of the National Project «Ecology».

полезных компонентов из ТКО возможно в результате их *обработки*, которая подразумевает предварительную подготовку отходов к дальнейшей утилизации и может включать в себя одну или несколько операций на основе механических и физико-химических методов:

- 1) сортировка отходов в пунктах приема и заготовки вторичного сырья, на сортировочных станциях, комплексах по переработке отходов, заводах и др.;
- 2) разборка отходов (производится в пунктах приема и заготовки вторичного сырья, на сортировочных станциях и т. п.);
- 3) очистка отходов (подразумевает извлечение полезных компонентов из их состава и физическую обработку отходов).

Кроме технологических способов сепарации и извлечения полезных компонентов из состава отходов результативным, по разным оценкам, является применение раздельных накопления и сбора отходов всех видов на местах их первичного накопления, в том числе и на контейнерных площадках. Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации во исполнение подпункта «л» пункта 4 Перечня поручений по реализации послания Президента Российской Федерации Федеральному Собранию от 24 января 2020 г. № 113-пр подготовлен проект Плана мероприятий («дорожная карта») по введению раздельного сбора твердых коммунальных отходов.

Морфологический состав ТКО динамичен в течение года, но, тем не менее, состав коммунальных отходов, образующихся от населения городских и сельских поселений в нашей стране, более или менее одинаков и относительно предсказуем.

Основная доля по массе приходится на пищевые отходы — до 27 %, бумагу — до 21 %, полимеры — до 19 %, а на отсев, по некоторым оценкам, приходится до 20 % [6—11]. Фракционный состав ТКО преимущественно представлен элементами 50—250 мм и составляет 53—55 % [10, 12]. Компоненты отходов, которые считаются наиболее ценными для изготовления вторичного сырья и продукции в России: бумага, картон, пластики и полимеры, металлы, резина (в основном отработанные шины).

Изменения в основополагающем нормативном правовом документе в сфере обращения с отходами, № 89-ФЗ, ввели новых участников сферы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными: региональный оператор по обращению (изм. от 2017 г.) и российский экологический оператор (изм. от 2019 г.).

Региональный оператор по обращению с ТКО (далее региональный оператор) несет ответственность за обращение с ТКО с момента погрузки таких отходов в мусоровоз в местах сбора и накопления ТКО и, можно сказать, является ключевым звеном в системе обращения с отходами. В субъекте федерации может быть один или несколько региональных операторов, которые выбираются на конкурсной основе региональными властями на срок не более 10 лет. Услуги региональных операторов оплачивают собственники отходов (население, юридические лица, индивидуальные предприниматели, в результате деятельности которых образуются отходы).

Российский экологический оператор (далее РЭО) — публично-правовая компания, созданная в 2019 г. в соответствии с указом Президента Российской Федерации. РЭО разрабатывает и корректирует федеральную схему обращения с ТКО, проводит экспертизу и готовит рекомендации при утверждении или корректировке региональных программ и территориальных схем обращения с отходами. Кроме того, РЭО осуществляет управление и координацию материально-сырьевого баланса (потоков отходов и финансовых потоков в системе обращения с отходами) и деятельности региональных операторов.

Результаты исследований

К внедрению раздельного накопления и раздельного сбора (далее РСО) отходов надо подходить программно и поступательно. Упрощенно алгоритм можно представить следующим образом (см. рис. 2). *Ключевым этапом внедрения РНО является инвентаризация отходов и идентификация потоков потенциальных вторичных материальных ресурсов* (под которыми следует понимать отходы или их компоненты, требующие индивидуального подхода при накоплении, сборе, транспортировании, обработке, обезвреживании и утилизации).

Система обращения с отходами функционирует в рамках федерального, регионального и муниципального правового поля. Участников системы обращения с отходами в РФ можно разделить на три основные группы. Все участники системы обращения с отходами каждой группы наделены ролями и обязанностями и должны соблюдать все нормативные требования, действующие на территории осуществления операций и процедур обращения с отходами.

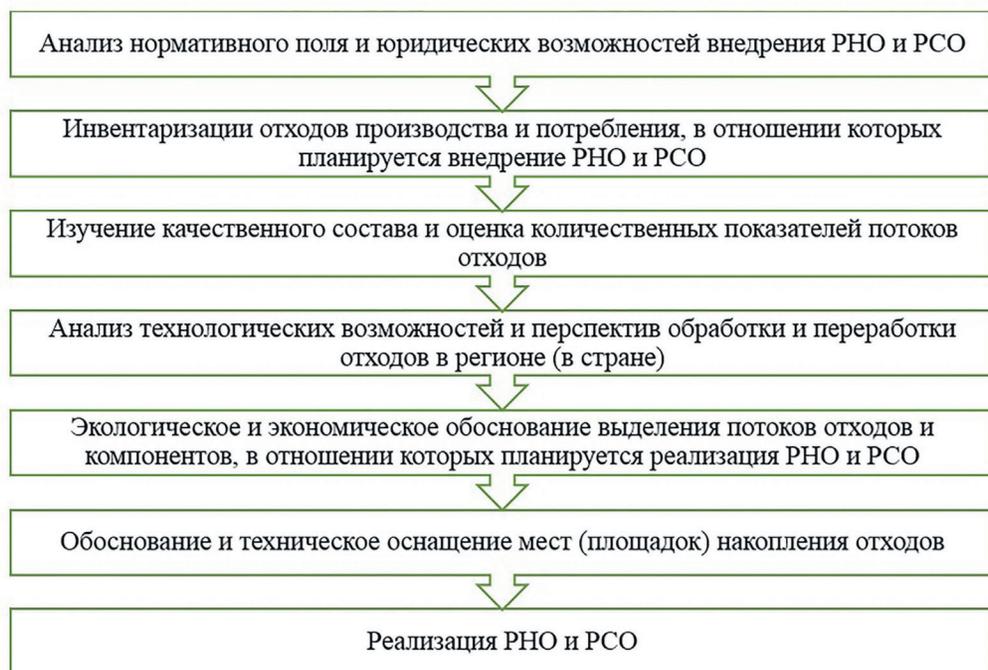


Рис. 2. Внедрение раздельного накопления и сбора отходов.

Fig. 2. Implementation of separate waste storage and collection.

1 группа — собственники отходов и потребители услуг по обращению с отходами (постоянное и сезонное население в многоквартирных, частных домовладениях, или их законные представители товарищества собственников жилья или недвижимости, управляющие компании, садоводческие некоммерческие товарищества (СНТ), все предприятия, учреждения, юридические лица, индивидуальные предприниматели, общества и т. п.).

2 группа — исполнители услуг по обращению с отходами (операторы и региональные операторы).

3 группа — контрольно-надзорные органы и органы исполнительной власти разных уровней (муниципальные, региональные, федеральные).

Отходы производства и потребления и даже ТКО, образующиеся в результате деятельности юридических лиц, отличаются в зависимости от производственной деятельности, имеют разные агрегатные состояния, химический, морфологический и фракционный составы и классы опасности для окружающей среды. С отходами от населения более очевидны качественный состав отходов и перспективы переработки. Для структурирования потоков отходов для внедрения раздельного накопления отходов на предприятии требуется проведение детальных эмпирических исследований морфологических и компонентных признаков отходов.

Первично выделены 12 потоков компонентов ТКО по их ключевым составляющим. На основе анализа методов обращения с отходами и состава отходов

выделены потоки отходов и их компонентов по возможности переработки: полностью перерабатываемые, частично перерабатываемые и неперерабатываемые. Становится очевидно, что составление потоков отходов только на основании морфологического состава не гарантирует пригодность соответствующих 12 потоков компонентов ТКО к полной переработке, без дополнительных технологических операций. После изучения фракционного состава отходов и их морфологических признаков (характерные элементы, изделия и т. п.) каждого из этих 12 потоков ТКО от населения были идентифицированы 29 потоков отходов и компонентов с указанием возможности их переработки, получения вторичного сырья и продукции (см. табл. 1), которые далее могут быть разделены на потоки в зависимости от способов обработки и переработки (например, изделия из полиэтилентерефталата — бутылки и одноразовые контейнеры).

Отходы (и их компоненты) становятся вторичным сырьем только после обработки и/или переработки, далее из вторичного сырья производят товары или иные виды вторичного сырья. Как видно из табл. 1, ТКО и компоненты отходов зачастую нуждаются в сортировке и разборке, чтобы исключить опасные составляющие или материалы, подлежащие разным видам переработки. Разборка отходов чаще всего требуется для сложносоставных отходов, композитной упаковки, одежды, обуви и т. п., где все компоненты не принадлежат одной из групп по составу, что усложняет их дальнейшее использование. Также необходима очистка и мойка изделий перед дальнейшей переработкой, например, с целью очистки пластиковых упаковок от остатков пищи, иных загрязнений и т. п. Среди полимеров и пластиков внимания требуют поливинилхлорид и полистирол, потому что редко перерабатываются

Таблица 1

Потоки вторичных материальных ресурсов, образующиеся в составе ТКО

The flows of secondary material resources generated in the MSW

Потоки отходов и компонентов, сформированные по:	
морфологическому составу	морфологическим признакам и характерным компонентам
1. Бумага, картон	1. Условно чистая макулатура (книги, газеты, журналы и картонные коробки), часто бывает с маркировкой «20», «21», «22» [13]. 2. Низкокачественная макулатура. 3. Влажная макулатура. 4. Термобумага (чеки).
2. Пищевые (органические) отходы	5. Овощные и фруктовые остатки и т. п. 6. Остатки продуктов питания, в том числе жидкие. 7. Загрязненные (перемешанные с мелкими фракциями стекла, пластика).
3. Текстиль	8. Натуральные ткани и материалы, незагрязненные. 9. Синтетические ткани.
4. Стекло	10. Смешанные (синтетические и натуральные) материалы. 11. Изделия из стекла, цветное стекло (часто бывают с маркировкой «70», «71», «72», «73», «74» [13]), оконные стекла, в том числе многослойные стекла. 12. Стекланный бой низкого качества.

Потоки отходов и компонентов, сформированные по:	
морфологическому составу	морфологическим признакам и характерным компонентам
5. Дерево	13. Крупные фракции древесины в составе предметов мебели и других предметов, которые легко извлечь из отходов.
6. Кожа	14. Содержащие фракции древесины менее 200 мм. 15. Верх обуви, галантерея (перчатки, ремни), другие предметы потребления из кожи.
7. Резина	16. Изделия, в которых компоненты животной кожи имеют соединения с синтетическими материалами и тканями (обувь, сумки, чемоданы, одежда) 17. Изделия из резины. 18. Изделия, в которых резиновые компоненты имеют соединения с натуральными и синтетическими материалами и тканями (обувь, сумки, чемоданы, одежда), пластмассами и полимерами (посуда, игрушки), металлами и т. п.
8. Черный металл	19. Консервные банки, посуда, предметы быта, изделия с маркировкой «40» [13] и т. п.
9. Цветной металл	20. Алюминиевые банки, фольга, провода, изделия с маркировкой «41» [13] и т. п.
10. Пластмассы и полимеры	21. Изделия из полиэтилентерефталата (ПЭТ) (с маркировкой «1» [13]): бутылки, флаконы, упаковочная лента, пленки, одноразовые пищевые контейнеры и др.). 22. Изделия из полиэтилена низкого давления (ПНД) (с маркировкой «2» [13]): крышки, емкости из-под бытовой химии и космических средств, строительных материалов и др.). 23. Изделия из поливинилхлорида (ПВХ) (с маркировкой «3» [13]): упаковки для лекарств, кондитерских изделий, кисломолочной продукции, емкости из-под бытовой химии и космических средств, оконные рамы, трубы, строительные материалы, термоусадочная пленка, изделия из искусственной кожи и др.). 24. Изделия из полиэтилена высокого давления (ПВД) (с маркировкой «4» [13]): пленки, пакеты и т. п.). 25. Изделия из полипропилена (ПП) (с маркировкой «5» [13]): детали для холодильного оборудования, крышки для бутылок, упаковки для кисломолочных и пищевых продуктов, медицинских изделий и др.). 26. Изделия из вспененного и обычного полистирола (ПС) (с маркировкой «6» [13]): контейнеры для яиц, подложки для фасованных продуктов в магазине, блоки пенопласта, пеноблоки, одноразовая посуда, игрушки упаковки для компакт-дисков, пищевых продуктов и др.). 27. Изделия из смеси полимеров (с маркировкой «7», «9», «abs» [13] или другие пластики кроме вышеупомянутых: искусственная кожа и полимерные ткани, упаковки и тара для товаров и пищевых продуктов, оксоразлагаемые или так называемые биоразлагаемые полимеры «d2w» и др.).
11. Многокомпонентные материалы	28. Изделия с маркировкой «81», «82», «84», «90» [13]: упаковка типа tetra pak, pure pac, tralin pak, комбиблок, роспак, упаковки от жвачек и т. п.
12. Отсев и виды отходов, не отнесенные к потокам выше	29. Компоненты различного состава и размера

в РФ и немногие предприятия оснащены соответствующим оборудованием. В последние годы в бытовом использовании получили распространение так называемые «биоразлагаемые» полимеры, которые под воздействием воздуха распадаются на микропластики, однако, современные технологии обработки не обладают способностью выделять оксоразлагаемые полимеры из общего потока пластика, поступающего на переработку, что может привести к тому, что партия полимерных материалов будет не подлежать переработке.

ТКО — это отходы IV класса опасности, однако, если не смешивать компоненты ТКО и их отдельно хранить, то будут накапливаться уже другие отходы даже III—V классов опасности в соответствии с Федеральным классификационным каталогом (Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 24) (например, 40200000000 — текстиль и изделия текстильные, утратившие потребительские свойства; 40500000000 — бумага и изделия из бумаги, утратившие потребительские свойства; 45100000000 — отходы стекла и изделий из стекла; 40400000000 — продукция из древесины, утратившая потребительские свойства; 43000000000 — резиновые и пластмассовые изделия, утратившие потребительские свойства; 46000000000 — лом и отходы черных и цветных металлов). Отходы, не относящиеся к ТКО, можно накапливать не только на контейнерных площадках, и к таким местам накопления и хранения отходов применяются дополнительные требования.

Определившись с количеством потоков отходов и компонентов, качественным составом каждого потока, необходимо организовать своевременный вывоз вторичных материальных ресурсов с мест первичного накопления. Периодичность вывоза компонентов ТКО при внедрении раздельного накопления и сбора отходов, не противоречащая требованиям санитарных норм (СанПиН 42-128-4690-88, СанПиН 2.1.2.2645-10, СанПиН 2.1.7.3550-19) [13] приведена в табл. 2.

Для достижения стратегических целей государства по доле обрабатываемых и утилизируемых отходов необходимо сокращать их поступления на размещение всеми собственниками отходов. В этой связи внедрение РНО и РСО безусловно актуально и целесообразно с учетом многокомпонентности и большого количества ежегодно образующихся и накапливаемых отходов производства и потребления в России. Для внедрения раздельного накопления отходов собственниками не требуется лицензия, но обязательно письменное согласие регионального оператора.

Региональные и муниципальные власти могут принять стандарты и ограничить (увеличить) количество и типы потоков. Структурирование и обособление потоков отходов в регионе определяется в рамках территориальных схем обращения с отходами. Особенности развития локальных системы обращения с отходами в населенных пунктах и муниципальных районах утверждаются органами местного самоуправления в рамках генеральных схем санитарной очистки территорий муниципальных образований и иных программных документах. Кроме того, «Схемы санитарной очистки территории» разрабатываются для садоводческих некоммерческих товариществ и утверждаются ими же, далее решения проектов СНТ включаются в проект «Генеральная схема санитарной очистки территории муниципального образования».

Таблица 2.

Периодичность вывоза компонентов ТКО
при внедрении раздельного накопления и сбора отходов
Frequency of export
of MSW components within separate accumulation and waste collection

№	Компоненты отходов	Периодичность вывоза
1.	Пищевые отходы.	Ежедневно
2.	Кости из жилых домов, лечебно-профилактических учреждений.	Ежедневно
3.	Кости из предприятий общественного питания, имеющих холодильные камеры.	Раз в 10 дней
4.	Кости из предприятий общественного питания при отсутствии холодильных камер.	2—3 раза в неделю
5.	Стекло, полимерные материалы, бумага, картон, металлы (и иные виды ВМР, не отнесенные к пп. 1—4) от всех юридических объектов (в том числе из пунктов приема, из пунктов-магазинов на приемные пункты (склады) предприятий по переработке вторичного сырья), на территории которых производится его сбор в сборниках и контейнерах.	По мере накопления
6.	Стекло, полимерные материалы, бумага, картон, металлы (и подобные виды вторичного сырья, не отнесенные к пп. 1—4) с мест их накопления (контейнерные площадки).	По мере накопления

Из опыта работы ООО «НПО «МЕГАПОЛИС» известно, что в последние годы в некоторых регионах и муниципалитетах применяют централизованную двухпотокую систему раздельного накопления отходов и их компонентов от населения, то есть в контейнеры двух типов для «сухих» и «смешанных» отходов на одном месте (площадке) их накопления. Обзор территориальных схем обращения с отходами в Российской Федерации и практическое участие в муниципальных программах специалистов ООО «НПО «МЕГАПОЛИС» показал, что двухпоточная схема уже применяется, например, в Московской области, где под «сухими» отходами понимают общий поток пластиков, полимеров, стекла, металлов, бумаги и картона. Во многих регионах в рамках территориальных схем обращения с отходами запланировано внедрение сортировки отходов на объектах обработки или переработки и утилизации, то есть после транспортирования ТКО, собранных в едином потоке на местах (площадках) накопления отходов.

После учреждения института регионального оператора сузилась зона ответственности и роль муниципальных органов самоуправления в системе обращения с ТКО. Однако, в «Генеральных схемах санитарной очистки территорий муниципальных образований», которые утверждают органами местного самоуправления, определяются порядок и этапы централизованного внедрения раздельных накопления и сбора отходов от населения в муниципальном образовании. Решение о централизованном внедрении раздельного сбора отходов от населения принимается муниципальными или региональными властями. При отсутствии программы внедрения раздельного накопления ТКО в муниципальном образовании и регионе население вправе самостоятельно организовать раздельное накопление отходов,

но с письменного разрешения регионального оператора или сдавать в пункты приема и заготовки вторичного сырья, организованные лицензированными операторами по обращению с отходами, или определенные в рамках муниципальных документов, таких как генеральная схема санитарной очистки территории муниципального образования. Технически РСО осуществляется либо самим региональным оператором, либо другим отраслевым оператором (при наличии разрешительной документации).

Юридические лица вправе самостоятельно внедрить систему раздельного накопления отходов (выявить полезные, экономически выгодные компоненты, заключить договоры с операторами, подобрать экологичные и экономичные способы накопления компонентов отходов (контейнеры, бункеры, прессы и т. п.). Раздельное накопление отходов с целью извлечения полезных компонентов на предприятиях на контейнерных площадках и помещениях для накопления отходов применимо для отходов, которые не относятся к токсичным, чрезвычайно и высокоопасным отходам. При раздельном накоплении ТКО из их состава образуются новые потоки отходов и ВМР, относящиеся в III—V классам опасности.

При желании внедрения РНО на предприятии или юридическими лицами, в том числе представляющими интересы населения (товарищество собственников жилья (недвижимости), управляющая компания), наиболее действенным подходом будет являться разработка природоохранной документации и «Программ внедрения раздельного сбора и накопления отходов», с учетом всех требований действующего законодательства и особенностей производственного цикла. Внедрение РНО осуществимо при экологически и экономически обоснованной программе и при активном участии сотрудников и населения.

Заключение

В федеральных нормативных правовых документах РФ рекомендуется отдавать предпочтение технологиям автоматизированной сортировки отходов. Внедрение раздельного накопления отходов производства и потребления представляется эффективным подходом для извлечения полезных компонентов из состава отходов и их подготовке к дальнейшей обработке, получения вторичных материальных ресурсов, изготовления и переработке вторичного сырья.

Выявлены 12 потоков потенциальных вторичных материальных ресурсов (требующих индивидуального подхода при накоплении, сборе, транспортировании) в составе ТКО от населения и 29 потоков отходов и компонентов с указанием возможности их переработки, получения вторичного сырья и продукции, с возможностью разделения на потоки в зависимости от способов обработки и переработки.

Установлено, что при раздельном накоплении и сборе ТКО образуются новые потоки отходов и ВМР, относящиеся в III—V классам опасности.

Периодичность вывоза компонентов ТКО при внедрении раздельного накопления и сбора отходов на местах (площадках) накопления ТКО определена

с учетом требований нормативных правовых актов. Отходы, не относящиеся к ТКО, допустимо накапливать не только на контейнерных площадках, но с учетом санитарных правил и норм.

Участники системы обращения с отходами в РФ разделены на три основные группы; описаны обязанности групп участников системы обращения с ТКО в рамках федеральных требований к системе обращения с отходами.

Предложен алгоритм внедрения раздельного накопления и раздельного сбора отходов от населения, организаций и предприятий (собственники отходов). Внедрение РНО должно прорабатываться и осуществляться в рамках программных документов: «Территориальная схема обращения с отходами» (регионы и субъекты Федерации), «Генеральная схема санитарной очистки территорий муниципальных образований» (муниципальный уровень, поселения и садоводства), «Программа внедрения раздельного сбора и накопления отходов» (для собственников отходов).

Список литературы

1. Паспорт национального проекта «Экология». [Электронный ресурс] // Официальный сайт правительства Российской Федерации. 2020. URL: <http://government.ru/info/35569>. (Дата обращения 11.02.2019).
2. Solid Waste Management in Germany, Japan, Korea, United States & Mexico. [Электронный ресурс] // Beston (Henan) Machinery Co. 2017. URL: <http://bestonsortingmachine.com/solid-waste-management-germany-japan-korea-united-states-mexico>. (Дата обращения 01.09.2020).
3. Галкина О.А., Ильиных Г.В., Вюни К. Анализ методов оптической сортировки твердых бытовых отходов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 4. С. 127—140.
4. Sweden's recycling is so revolutionary, the country has run out of rubbish. [Электронный ресурс] // Independent 2016. Access Mode: <https://www.independent.co.uk/environment/sweden-s-recycling-is-so-revolutionary-the-country-has-run-out-of-rubbish-a7462976.html>. (Дата обращения 01.09.2020).
5. Дикинц А.В., Илларионов А.В., Лебедева А.А. Аспекты выбора технологий обезвреживания и утилизации опасных отходов // Экология и промышленность России. 2010. Вып. 6. С. 52—55.
6. Ильиных Г.В. Процент отбора вторичного сырья при сортировке твердых бытовых отходов: расчетный и фактический // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 4. С. 115—126.
7. Ламзина И.В., Желтобрюхов В.Ф., Шайхиев И.Г. Анализ методов сортировки твердых бытовых отходов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 5. С. 244—247.
8. Преликова Е.А., Юшин В.В., Вертакова Ю.В. Эколого-экономические приоритеты раздельного сбора отходов // Лесотехнический журнал. 2019. Вып. 1 (33). С. 187—195. doi: 10.12737/article_5c92017294e4b5.84748067.
9. Каплина С.П., Семенова М.В., Дзюба К.С., Андронов С.В., Каманина И.З., Старостина И.А. Твердые коммунальные отходы как вторичные материальные ресурсы (на примере города Дубна Московской области) // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 93—98.
10. Систер В.Г., Мирный А.Н., Скворцов Л.С. Твердые бытовые отходы: Справочник. М.: Изд. АКХ им. К.Д. Памфилова, 2001. 320 с.
11. Никанорова А.А., Лебедев Д.А., Никаноров П.А., Пименов А.Н., Венцюлис Л.С. Перспективы извлечения вторичных материальных ресурсов из ТКО в Ленинградской области // Региональная экология. 2019 г. № 56. С. 72—85. doi: 10.30694/1026-5600-2019-2-72-85.
12. Польшгалов С.В., Ильиных Г.В., Кортаев В.Н. Зависимость теплотехнических свойств твердых коммунальных отходов от их компонентного и фракционного состава // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 70—78. doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-070-078.

13. Commission decision of 28 January 1997 establishing the identification system for packaging materials pursuant to European Parliament and Council Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. [Электронный ресурс] // Официальный сайт Европейской комиссии (European Commission). 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31997D0129&from=EN>. (Дата обращения 01.09.2020).
14. Никанорова А.А., Фураева Д.И., Лебедев Д.А. Учет климатических особенностей Российской Федерации в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами // Ученые записки РГТМУ. 2019. № 57. С. 98—116. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-98-116.

References

1. *Opublikovan pasport natsional'nogo proyekta «Ekologiya»*. Published passport of the national project “Ecology”, *Ofitsial'nyy sayt pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii*. The official website of the government of the Russian Federation. 2020. Available at: <http://government.ru/info/35569>. (Accessed 11.02.2020). [In Russian].
2. Solid Waste Management in Germany, Japan, Korea, United States & Mexico. [Электронный ресурс] // Beston (Henan) Machinery Co. 2017. Available at: <http://bestonsortingmachine.com/solid-waste-management-germany-japan-korea-united-states-mexico/> (Accessed 01.09.2020).
3. Galkina O., Ilinykh G., Wunsch C. Analysis of methods of municipal Solid waste optical sorting. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya*. PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urbanistika. 2014, 4: 127—140. [In Russian].
4. Sweden's recycling is so revolutionary, the country has run out of rubbish. Independent 2016. Available at: <https://www.independent.co.uk/environment/sweden-s-recycling-is-so-revolutionary-the-country-has-run-out-of-rubbish-a7462976.html>. (Accessed 01.09.2020).
5. Dikinis A.V., Illarionov A.V., Lebedeva A.A. Aspects of the choice of technologies for the disposal and disposal of hazardous waste. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. Ecology and industry of Russia. M: Izdatel'skiy Dom ZAO «Kalvis». 2010, 6: 52—55. [In Russian].
6. Ilinykh G.V. Recyclable recovery rate when household waste sorting: estimated and real. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya*. PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urbanistika. 2014, 4: 115—126. [In Russian].
7. Lamzina I.V., Zheltobryukhov V.F., Shaikhiev I.G. Analysis of methods for sorting solid household waste. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. Bulletin of the Technological University. 2015, 5: 244—247. [In Russian].
8. Prelikova Ye.A., Yushin V.V., Vertakova YU.V. Environmental and economic priorities of separate waste collection. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. Forestry journal. 2019, 1 (33): 187—195. [In Russian]. doi: 10.12737/article_5c92017294e4b5.84748067.
9. Kaplina S.P., Semenova M.V., Dzyuba K.S., Andronov S.V., Kamanina I.Z., Starostina I.A. Solid communal waste as secondary material resources (on the example of the city of Dubna, Moscow region). *Uspekhii sovremennoyo yestestvoznaniya*. Successes of modern natural science. 2018, 2: 93—98. [In Russian].
10. Sister V.G., Mirnyy A.N., Skvortsov L.S. *Tvordyye bytovyye otkhody: Spravochnik*. Solid Waste: Handbook. Moscow: Izd. AKH K.D. Pamfilova, 2001: 320. [In Russian].
11. Nikanorova A., Lebedev D., Nikanorov P., Pimenov A., Ventsyulis L. Prospects for extracting secondary material resources of MSW in Leningrad region. *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2019, 56: 72—85. [In Russian]. doi: 10.30694/1026-5600-2019-2-72-85.
12. Polygalov S.V., Ilinykh G.V., Korotaev V.N. Dependence of the thermotechnical properties of solid municipal wastes on their component and fractional composition. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. Theoretical and Applied Ecology. 2018: 2, 70—78. [In Russian]. doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-070-078.
13. Commission decision of 28 January 1997 establishing the identification system for packaging materials pursuant to European Parliament and Council Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste, official website of European Commission. 2020. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31997D0129&from=EN> (Accessed 01.09.2020).

14. *Nikanorova A.A., Furaeva D.I., Lebedev D.A.* Consideration of the climatic characteristics of the Russian Federation in waste management. *Uchenyye zapiski RGGMU*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological Universit. 2020: 4 (57), 98—116. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-98-116. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 16.04.2020

Принята после доработки к публикации 18.10.2020

Сведения об авторах

Лебедев Дмитрий Андреевич, генеральный директор ООО «Научно-проектная организация «МЕГАПОЛИС», eco@themegapolis.ru.

Никанорова Анастасия Андреевна, канд. геогр. наук, научный сотрудник лаборатории систем обращения с отходами, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, a.a.nikanorova@gmail.com.

Information about authors

Lebedev Dmitriy A., Science and engineering company “MEGAPOLIS” Ltd., General director.

Nikanorova Anastasiya A., PhD (Geogr. Sci.), Waste management systems Laboratory, Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, Researcher.

Пространственное распределение и источники антропогенного морского мусора на побережье Калининградской области

О.И. Лобчук¹, А.В. Килесо^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, olga_may87@mail.ru

^{1,2} Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Побережье Калининградской области является одной из часто посещаемых туристических зон в Российской Федерации как местными жителями, так и гостями региона. В данной статье приводится оценка уровня загрязнения морским мусором побережья Калининградской области (юго-восточная часть Балтийского моря). Оценка проводилась с использованием широко используемого метода OSPAR. Антропогенный мусор составляет 90 % от всего найденного и оцененного мусора на пляжах Калининградской области Туризм, рыболовство и строительство — основные источники загрязнения.

Ключевые слова: морской мусор, пластик, OSPAR, Калининградская область, Балтийское море.

Spatial distribution and sources of anthropogenic marine litter on the sea shore of the Kaliningrad region

O. Lobchuk¹, A. Kilesso^{1,2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

olga_may87@mail.ru

^{1,2} Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

The seacoast of the Kaliningrad region is one of the most visited tourist areas in the Russian Federation, both by local residents and guests of the region. This article provides an assessment of marine debris pollution of the beaches the coast of the Kaliningrad region (South-Eastern part of the Baltic Sea) Assessment was done using the widely used OSPAR method. High recreational load, construction along the entire coast, fishing and shipping affect the beach pollution by marine debris, especially synthetic polymers (plastics). These polymers are characterized by an exceptionally long period of degradation in the natural marine environment. Monitoring surveys show the presence of different types of litter on the beaches. Litter of natural origin such as wood chips, cones, the remains of wood, amber, feathers, algae. Anthropogenic litter accounts for 90 % of all found and evaluated garbage on the beaches of the Kaliningrad region. Cigarette butts and filters, plastic coating, paraffin wax, bottles, balloons and ribbons, geosynthetics, ropes, candy bags and wrappers, rubber, polystyrene foam, pellets were found. Cigarette filters (16 %), polystyrene foam (17 %) and geosynthetic materials (14 %) were the most common examples of litter found on beaches. The number of samples collected on a 100 m long beach varied from 165 pieces (0.06 pieces/m²) in Baltiysk to 2216 pieces (1.47 pieces/m²) in Zelenogradsk. Tourism, fishing and construction are the main sources of pollution, the level of which is weakly dependent on the seasons of the year. The performed quantile analysis indicates a rather large variability in the number of samples found both for different seasons and for different beaches of the Kaliningrad region. There is no clear dependence on the season or place. Only macro litter, such as plastic bottles, clothes, and children's toys, are characterized by low values of the median and interquartile distance.

Keywords: marine litter, plastics, OSPAR, Kaliningrad region, Baltic Sea.

For citation: O. Lobchuk, A. Kileso. Spatial distribution and sources of anthropogenic marine litter on the sea shore of the Kaliningrad region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 61: 521—533. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-521-533

Введение

Пластик в современном мире является одним из наиболее востребованных материалов и используется практически во всех областях промышленности. Физико-химические свойства пластика, обеспечивающие его прочность, долговечность, легкость, в сочетании с низкой себестоимостью, делают этот материал практически незаменимым в строительстве, на производстве, в быту. Плотность многих пластиков сравнима с плотностью воды, и пластиковый мусор выносится с водосборной территории в озера и реки, поступает в моря и океаны [1, 2, 3].

Загрязнение морским мусором и его попадание в морскую среду стали одной из глобальных экологических проблем в современном мире. Морской мусор разнообразен по своему составу, часто встречаются материалы из полимеров, пенополистирола, краски, геотекстиля, резины. Большинству перечисленных материалов нужны сотни и тысячи лет, чтобы разрушиться в морской среде. Это опасность для морских организмов, для которых такой мусор наносит физический вред при проглатывании или запутывании животных, птиц в нем [2, 4]. Все животные, такие как птицы, рыбы и беспозвоночные, особенно подвержены воздействию микро-мусора (< 5 мм) и мезо-мусора (5—25 мм) из различных видов пластмасс [5]. Поедание морского мусора, запутывание в рыболовецких сетях ведут к гибели обитателей Балтийского моря [4, 6].

Изделия из пластика и полистирола классифицируются как основной источник морского мусора во всем мире [7], а в Балтийском море они составляют примерно 70 % общего морского мусора на побережье [8].

Побережье Калининградской области — популярное место отдыха как для российских туристов, так и для иностранных гостей [6, 9, 10]. С нарастанием рекреационной нагрузки на пляжи, с сопутствующей активизацией строительства в прибрежной зоне моря, нарастает и загрязнение морской среды отходами антропогенной деятельности, особенно синтетическими полимерами (пластиковыми) с исключительно продолжительным периодом деградации в естественных условиях морской среды [11, 12, 13].

Цель статьи — оценка уровня загрязнения морским мусором побережья Калининградской области (юго-восточная часть Балтийского моря). Оценка проводилась с использованием широко используемого метода OSPAR. Высокая рекреационная нагрузка, строительство вдоль всего побережья, рыбная ловля и судоходство влияют на загрязнение пляжей морским мусором, в особенности пластиковыми изделиями и их фрагментами. Эти пластиковые изделия характеризуются исключительно длительным периодом разложения в естественной морской среде. Мониторинговые исследования показывают наличие различных видов мусора на пляжах. Мусор естественного происхождения: щепа, шишки, остатки древесины, янтарь, перья, водоросли и антропогенный мусор, который составляет

90 % от всего найденного и оцененного мусора на пляжах Калининградской области. Были обнаружены окурки и фильтры, пластиковые изделия и их фрагменты, парафин, бутылки, воздушные шары и ленты, геосинтетические материалы, веревки, пакеты и обертки для конфет, резина, пенополистирол, гранулы. Туризм, рыболовство и строительство — основные источники загрязнения.

Материалы и методы

Для оценки загрязнения были выбраны шесть городских и поселковых пляжей на побережье Калининградской области (рис. 1): (1) Балтийская (Вислинская) коса, (2) пляж г. Балтийск, (3) пляж пос. Янтарный (признанный в 2016 г. одним из лучших пляжей в мире по удобству и чистоте), (4) пляж пос. Пионерский, (5) пляж г. Зеленоградска — корень Куршской косы, (6) пляж национального парка Куршская коса в районе пос. Морское.

Для классификации морского мусора был использован метод OSPAR [14]. Методика OSPAR была предложена в 1992 г. и стала первым единым стандартизованным методом мониторинга морского мусора антропогенного происхождения для побережья Северо-Атлантического региона. Таблица стандартного мониторинга включает 11 типов загрязнителей (пластик / полистирол, металл, бумага и картон, дерево, ткань, резина, стекло, керамика, санитарные и медицинские отходы и другое (что не вошло в перечень или не было точно установлено, куда относится)) [14, 15].

Согласно методике OSPAR, пляжи должны:

- состоять из песка или гравия;
- подвергаться воздействию открытого моря в течении всего года;
- быть доступными для исследователей весь год;
- минимальная длина пляжа должна быть не менее 100 м и, по возможности, более 1 км в длину.

Мониторинг рекомендуется проводить на как минимум двух 100-метровых участках на одном пляже четыре раза в год (в разные сезоны). Для 100-метрового участка установлен минимум нахождения 100 различных предметов мезо- (5—25 мм) и макро- (> 25 мм) мусора на поверхности пляжа.

В Европе в основном используют метод OSPAR как для городских, так и для сельских пляжей. На галисийском побережье Испании, где средняя годовая оценка мусора на пляжах составляла 1016 ± 633 шт. / 100 м [16]. На четырех пляжах в юго-восточной части Северного моря такая оценка составила от 105 до 435 шт. / 100 м [17]. В центральной Балтике (Финляндия, Швеция, Латвия, Эстония) на городских пляжах было обнаружено в среднем 237 шт. / 100 м по сравнению с 76 шт. / 100 м на сельских пляжах. Сигаретные фильтры выделялись отдельно, т. к. составляли большой процент от общего числа мусора (49 шт. / 100 м в сельской местности и 302 шт. / 100 м на городских пляжах [14]. В исследовании Valčiūnas и Blažauskas [13] антропогенный мусор на пляжах Литвы составили от 138 до 340 шт. / 100 м (в среднем 222 шт.). В течение 5 лет группа исследователей [18, 19] проводили регулярный мониторинг пляжей (методология OSPAR, 4 раза

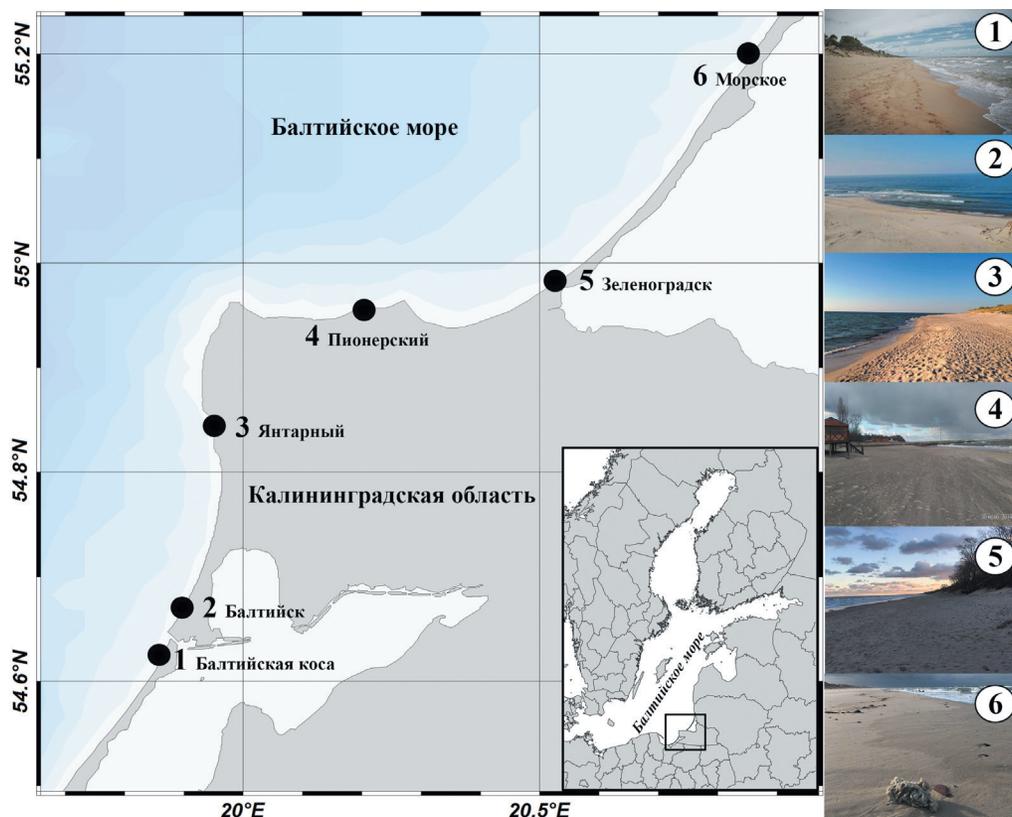


Рис. 1. Карта с точками мест отбора проб в ходе экспедиций в 2019—2020 гг.

Цифрами обозначены пляжи: 1 — Балтийская коса; 2 — Балтийск; 3 — Янтарный; 4 — Пионерский; 5 — Зеленоградск; 6 — Куршская коса, Морское. Справа показаны пляжи, на которых производился мониторинг.

Fig. 1. Map with sampling points during expeditions in 2019—2020.

The numbers indicate the beaches: 1 — The Baltic Spit; 2 — Baltiysk; 3 — Yantarny; 4 — Pionersky; 5 — Zelenogradsk; 6 — The Curonian Spit, Morskoe. On the right the beaches on which monitoring was carried out are shown.

в год) на 35 пляжах вдоль побережья Германии и Литвы на Балтийском море и обнаружили, что вдоль побережья Литвы среднее количество элементов варьировалось от 138 до 340 шт., а вдоль побережья Германии — от 7 до 404 шт., при этом среднее значение составляло 47 шт. [20].

В данной статье представлены результаты исследований за три месяца 2019—2020 гг. (июль, октябрь, январь) соответствующие сезонам года. Пляжи были разбиты на две подгруппы: первая — городские пляжи, (Янтарный, Зеленоградск, Пионерский) и сельские пляжи (Балтийская коса, Балтийск, Морское — Куршская коса). Каждая подгруппа исследовалась в один день, погода выбиралась после шторма. Координаты каждой точки мониторинга были отмечены с помощью GPS.

Результаты

За три исследуемых месяца (июль, октябрь, январь) 2019—2020 гг. было найдено всего 9584 единиц антропогенного морского мусора на шести пляжах Калининградской области (табл. 1). Все собранные образцы заносились в протоколы метода OSPAR. Согласно этому протоколу, было обнаружено 54 типа различного мусора, но только 12 из них находились регулярно на всех шести пляжах и во все сезоны. Предметы, которые было трудно классифицировать, согласно методике, были отнесены в раздел «Другие объекты».

Таблица 1

Распределение морского антропогенного мусора
для трех месяцев 2019—2020 гг.

Distribution of marine anthropogenic litter for three month 2019—2020

Месяц Пляж	Июль		Октябрь		Январь	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Балтийская коса	362	14,4	377	9,4	416	13,7
Балтийск	165	6,6	312	7,7	197	6,7
Янтарный	563	22,4	461	11,4	1022	33,6
Пионерский	782	31,2	226	5,6	334	11,0
Зеленоградск	303	12,1	2216	55,0	619	20,3
Морское	333	13,3	439	10,9	457	15,0
Всего	2508	100	4031	100	3045	100

Примечание: шт. — количество единиц собранного мусора, % — проценты от общего количества собранного мусора в данном месяце на всех исследуемых пляжах.

Табл. 1 показывает, что максимальное число найденных образцов в июле было в г. Пионерский (782 шт. или 31,2 % от общего числа найденных образцов в этом месяце). В октябре в Зеленоградске (2216 шт. или 55 %). В январе грязнее всех оказался Янтарный (1022 шт. или 33,6 %). Распределение морского антропогенного мусора по сезонам неравномерно, никаких зависимостей выявлено не было. Вероятнее всего, распределение зависит от посещаемости пляжей и штормовых ветров, которые выносят мусор на берег.

В летний месяц количество мусора на квадратный метр меньше, чем в осенней и зимний периоды; возможно, это связано с тем, что мусор с пляжей убирается городскими службами или волонтерами.

Пик в Зеленоградске связан с погодными условиями и большой посещаемостью пляжа. Продолжительный ветер, послештормовая съемка и скопление людей дали такой результат.

Увеличение мусора в Янтарном и Морском зимой также связано с погодными условиями и туризмом. Данные пляжи являются любимыми местами отдыха жителей области и туристов — зима 2019—2020 г. была теплой, бесснежной и располагала к поездкам на море.

На остальных пляжах разброс небольшой:

- летом — от 0,06 шт./м² в Балтийске до 0,14 шт./м² на Балтийской косе,

- осенью — от 0,03 шт./м² в Пионерском до 0,15 шт./м² в Морском (Зеленоградск не учитывается),

- зимой — от 0,05 шт./м² в Пионерском до 0,26 шт./м² в Янтарном.

Исключая выброс в Зеленоградске, средняя концентрация загрязнения пластиковым мусором по всем данным для пляжей Калининградской области составляет 0,13 шт./м². Средние по сезонам: 0,12 шт./м² (лето), 0,12 шт./м² (осень), 0,15 шт./м² (зима).

Анализ собранных образцов (табл. 2) показал, что основными типами антропогенного мусора, обнаруженного на пляжах Калининградской области, являются: пластиковые изделия и их фрагменты — 25 %, пенополистирол — 17 %,

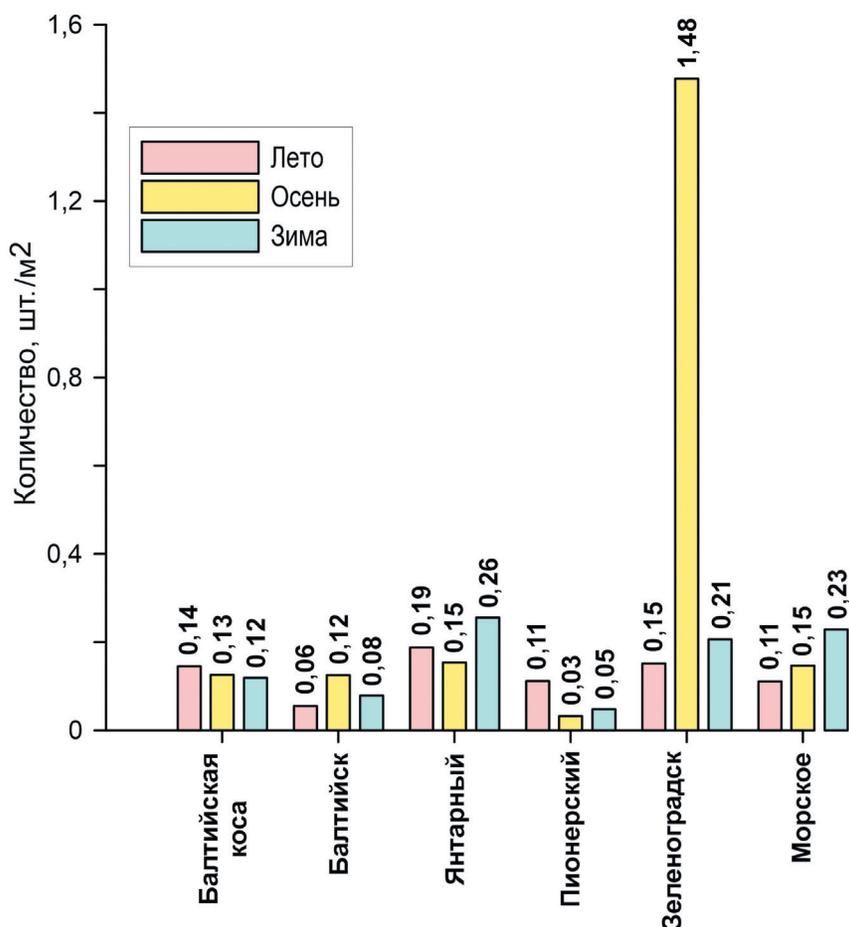


Рис. 2. Распределение концентраций (шт./м²) антропогенного морского мусора по пляжам Калининградской области летом (июль), осенью (октябрь) и зимой (январь).

Fig. 2. Distribution of concentrations (pcs/m²) of anthropogenic marine litter on the beaches of the Kaliningrad region in summer (July), autumn (October) and winter (January).

сигаретные фильтры — 16 %. Также зафиксировано большое количество мусора, представляющего собой разрушенный геосинтетический материал, доля которого составила 14 % от общего количества образцов. На парафин, пластиковые стаканчики и крышки от бутылок, воздушные шары и ленты, пеллеты приходится по 2 % от всего собранного мусора. Из данных видно, что пластик или изделия из него — это 90 % от всего собранного мусора на побережье Калининградской области.

Таблица 2

Распределение собранного мусора по типам OSPAR
Distribution of litter collected by type OSPAR

Тип загрязнителя	%	шт.
Бутылки пластиковые	1	99
Воздушные шары и ленты	2,1	198
Геотекстиль/геотекстильные мешки	14	1343
Другое (одежда, обувь, детские игрушки)	0,4	42
Пенополистирол	17,2	1648
Пеллеты	2,1	198
Пластиковые изделия и их фрагменты	24,9	2385
Пластиковые крышки и стаканчики	2,4	231
Сигаретные фильтры	16,2	1550
Стекло, керамика, бумага, металл	9,4	904
Парафин	2,5	239

Примечание: шт. — количество единиц собранного мусора, % — проценты от общего количества собранного мусора в данном месяце на всех исследуемых пляжах.

Статистический анализ распределения по типам OSPAR обнаруженного мусора выполнялся с помощью квантильного анализа [21]. Данный подход эффективен при анализе малых выборок, для которых затруднительно определить закон распределения. Для каждого типа мусора для квантильного анализа использована выборка объемом 18 значений: наблюдения на 6 мониторинговых участках в течение трех сезонов. Построенное распределение «ящиков с усами» (рис. 3) для различных типов мусора показало, что наиболее часто встречаемым мусором является пластик, сигаретные фильтры и пенополистирол, медианные значения количества обнаруженных образцов которых составили 131, 70,5 и 54,5 шт. соответственно. Также для данных типов мусора характерна и максимальная изменчивость в количестве обнаруженных образцов при мониторинговых работах. О данном факте свидетельствуют максимальные значения интерквартильного расстояния, графическое представление которого соответствует длине вертикальной стороны прямоугольника на рисунке. Кроме того, практически для всех типов мусора характерно наличие экстремально большого значения обнаруженных образцов, которое в несколько раз может превосходить медианное значение.

Выполненный квантильный анализ свидетельствует о достаточно большой изменчивости в количестве обнаруженных образцов как для различных сезонов, так и для различных пляжей Калининградской области. Не прослеживается четкой

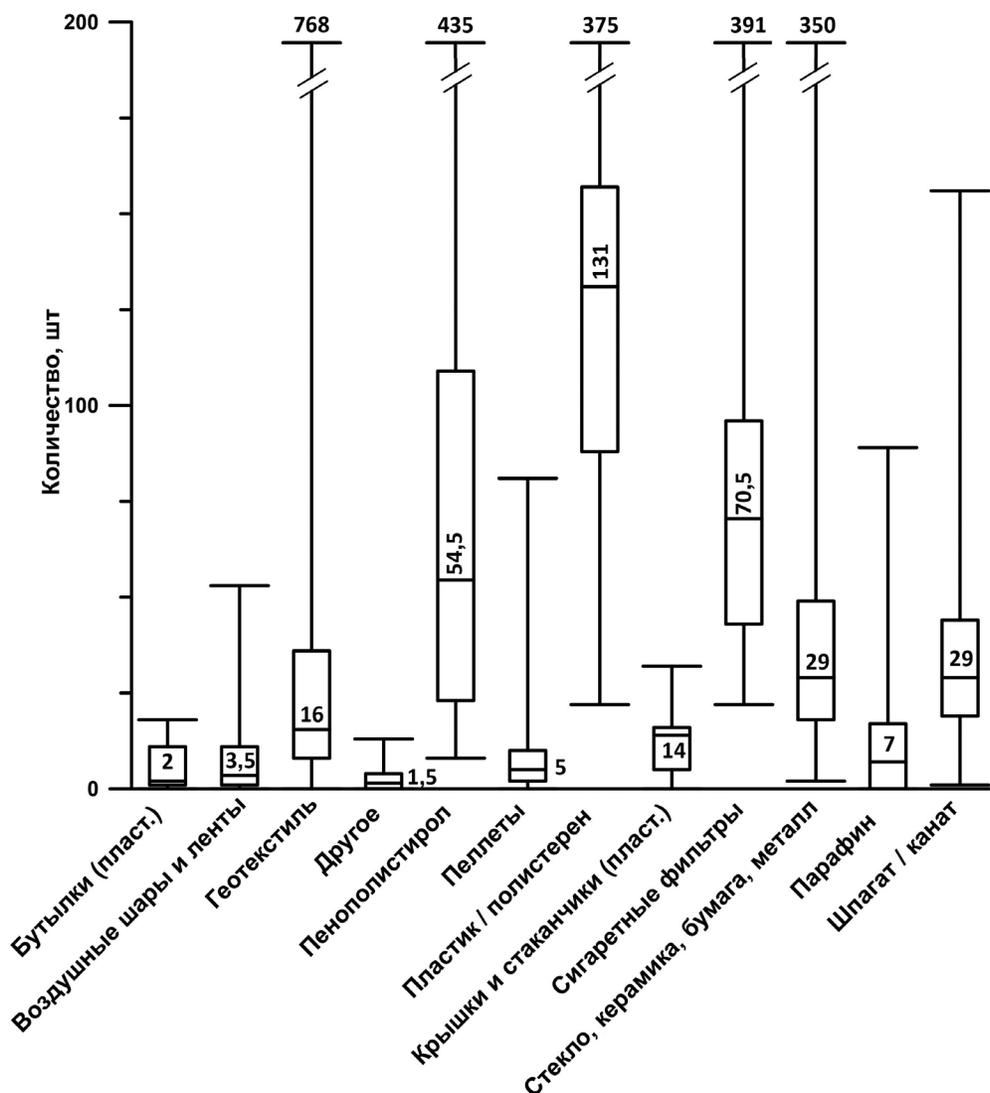


Рис. 3. Квантильный анализ распределения по типам OSPAR обнаруженных образцов мусора на 6 пляжах Калининградской области за три месяца, соответствующие летнему, осеннему и зимнему сезонам. В центре прямоугольников обозначено медианное значение. Верхний и нижний «усы» соответствуют максимальному и минимальному количеству обнаруженных образцов соответствующего типа мусора.

Fig. 3. Quartile analysis of the distribution of anthropogenic marine litter on 6 beaches of the Kaliningrad region by OSPAR types for three months corresponding to summer, autumn and winter seasons. The median value is shown in the center of the rectangles. The top and bottom “whiskers” correspond to the maximum and minimum number of detected samples of the corresponding type of litter.

зависимости от сезона или места. Только для макромусора, такого как пластиковые бутылки, одежда, детские игрушки, характерны низкие значения медианы и интерквартильного расстояния.

Классификация мусора по категориям OSPAR (рис. 4) показала, что для некоторых образцов единого источника установить не удастся — они отнесены к категории «Другое».

К категории «Туризм» были отнесены тот мусор, который мог быть потенциально оставлен на побережьях отдыхающими (сигаретные фильтры и окурки, пластиковые стаканчики, тарелки, обертки от конфет, трубочки от детского сока и др.) К категории «Строительство» был отнесен мусор, используемый при строительстве (геосинтетика, пенополистирол, монтажная пена). К категории «Рыболовство» был отнесен мусор, оставленный на берегу рыбаками или выброшенный с судов в море и прибившийся к берегу (рыболовецкие сети, лески, буи, канаты, снасти).

Основными источниками загрязнения морским антропогенным мусором являются туризм (58 %), строительство (27 %) и рыболовство (8 %). В г. Зеленоградске

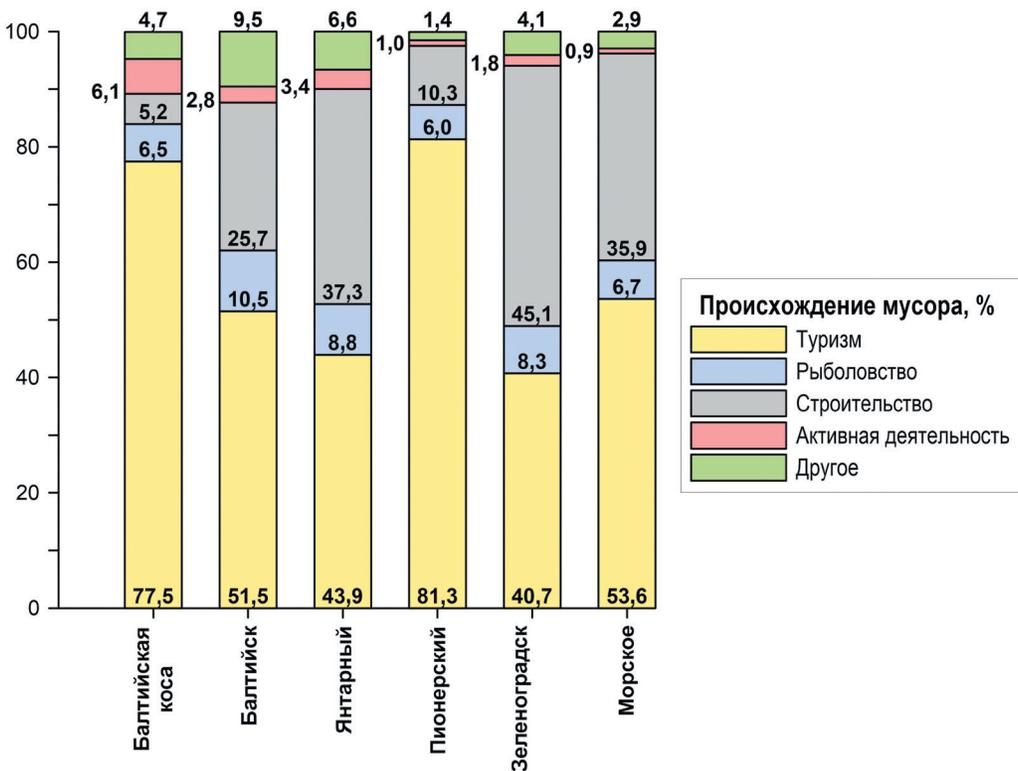


Рис. 4. Основные источники загрязнения на пляжах Калининградской области.

Fig. 4. The main sources of pollution on the beaches of the Kaliningrad region.

40,7 %, в г. Пионерский — 81,3 %. В этой категории стоит выделить отдельно окурки и сигаретные пачки, они составляют 65 % от всех исследуемых образцов из этой категории.

Далее, строительство — 45,1 % в Зеленоградске и 5,2 % на Балтийской косе.

Вклад активной деятельности (воздушные шары и ленты, подарочные упаковки) и рыболовства не велик по сравнению с двумя предыдущими и варьируется от 0,9 до 8,8 %. Выделяется лишь Балтийск, который в категории рыболовство занимает 10,5 %.

Заключение

По сравнению с результатами для региона Северного моря, где количество морского прибрежного мусора может варьироваться от 236 до 6429 шт. / 100 м, описанных в работе [2], количество мусора на побережье Калининградской области (юго-восточная часть Балтийского моря) ниже и составляет от 674 до 3138 шт. / 100 м. Обследование берегов на наличие морского мусора, выброшенного на берег, проведенного для берегов Литвы [13, 17, 18, 20], показало, что количество мусора может варьироваться от 76 шт. / 100 м (на сельских пляжах) до 237 шт. / 100 м (на городских пляжах), что ниже для результатов Калининградской области, для которой на сельских пляжах морского мусора обнаружено 340 шт. / 100 м и на городских пляжах — 725 шт. / 100 м.

Данное исследование показало, что доминирующим видом антропогенного морского мусора на побережье Калининградской области является пластик — в общей сложности около 90 % от всех собранных образцов. Сигаретные фильтры (16 %), пенополистирол (17 %) и геосинтетика (14 %) были самыми распространенными образцами мусора, найденными на пляжах области. Количество образцов, собранных на пляже протяженностью 100 м, варьировалось от 165 шт. (0,06 шт./м²) в Балтийске до 2216 шт. (1,47 шт./м²) в Зеленоградске в сезон. Основными источниками загрязнения являются туризм (58 %), строительство (27 %) и рыболовство (8 %).

Благодарности

Исследования проводятся при поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области, грант № 19-45-393006-п_мол_а. Обработка проб в лаборатории частично выполнялась в рамках госзадания ИО РАН (тема № 0149-2019-0013).

Acknowledgments

The research is carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Kaliningrad Region, Grant No. 19-45-393006-p_mol_a. Sample processing in the laboratory was partially carried out within the framework of the state assignment of the IO RAS (topic No. 0149-2019-0013).

Список литературы

1. UNEP, 2009. Marine Litter: A Global Challenge. UNEP. Nairobi. P. 232.
2. *Cauwenberghe, L., Claessens, M., Vandegheuchte, M.B., Mees, J.* Assessment of marine debris on the Belgian Continental Shelf. *Marine Pollution Bulletin* 73. 2013. P. 161—169. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.05.026.
3. GESAMP. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: A Global Assessment, 2015.
4. *Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B.* A Comparison of Plastic and Plankton in the North. *Marine Pollution Bulletin*. 2001, Dec. 42(12):1297—300. doi: 10.1016/s0025-326x(01)00114-x.
5. UNEP, GRID, 2016. Marine Litter Vital Graphics: United Nations Environment Programme and GRID-Arendal. www.unep.org, www.grida.no.
6. *Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П.* Микропластик в водной толще, донных осадках и песках пляжей юго-восточной части Балтийского моря: концентрации, распределение частиц по размерам и формам // Региональная экология. 2019. № 2 (56). С. 1—14. doi: 10.30694/1026-6500.
7. *Aniansson B., Bell G., Fátima B., Dagevos J., Elliot B., Fleet D.M., Guéna A., Hägerhäll B., Jørgensen H.H., Kerckhof F., Mourriño F.L., Nickerson R., Nilsson P., Olin R., Span I., Sverrisdóttir S., Wenneker B.* OSPAR Pilot Project on Monitoring Marine Beach Litter: Monitoring of marine litter in the OSPAR region Carson HS. Colbert SL. 2007.
8. *Oosterhuis F., Papyrakis E., Boteler B.* Economic instruments and marine litter control. *Ocean & Coastal Management* 102. 2014. P. 47—54. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2014.08.005.
9. *Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П.* Особенности распределения микропластика на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море) // Региональная экология. 2018. № 1 (51). С. 108—121. doi: 10.30694/1026-5600-2018-1-108-121.
10. *Esiukova E.* Plastic pollution on the Baltic beaches of the Kaliningrad region, Russia. 2017. *Mar. Pollut. Bull.* 114. P. 1072—1080. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.10.001.
11. *Лобчук О.И., Килесо А.В.* Оценка загрязнения пляжей юго-восточной Балтики пластиковым мусором (Метод OSPAR) // Проблемы регионального развития в начале XXI века. Материалы международной научной конференции / Под редакцией Г.М. Федорова, Л.А. Жиндарева, А.Г. Дружинина, Т. Пальмовского. 2019. С. 253—259.
12. *Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E.* On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 108. 2016. P. 105—112. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048.
13. *Balčiūnas A., Blažauskas N.* Scale, origin and spatial distribution of marine litter pollution in the Lithuanian coastal zone of the Baltic Sea. *Baltica*. 2014. doi: 10.5200/baltica.2014.27.14.
14. OSPAR, 2010. OSPAR Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beach in the OSPAR Maritime Area. Agreement Number 2010-02. P. 84. Available at: www.ospar.org. (accessed June 2017).
15. *Gago J., Galgani F., Maes T., Thompson R.C.* Microplastics in seawater: recommendations from the marine strategy framework directive implementation process. *Front. Mar. Sci.*, 3. 2016. doi: 10.3389/fmars.2016.00219.
16. *Schultz C., Powell K., Crossley A.* Analytical approaches to support current understanding of exposure, uptake and distributions of engineered nanoparticles by aquatic and terrestrial organisms. *Ecotoxicology* 24. 2015. P. 239—261. doi:10.1007/s10646-014-1387-3.
17. *Schernewski G., Balciunas A., Gräwe D., Gräwe U., Klesse K., Schulz M., Wesnig S., Fleet D., Haseler M., Möllman N., Werner S.* Beach macro-litter monitoring on southern Baltic beaches: results, experiences and recommendations. *J. Mar. Coast. Conserv.* 2. 2018. P. 5—25. doi: 10.1007/s11852-016-0489-x.
18. *Haseler M., Weder C., Buschbeck L., Wesnig S., Schernewski G.* Cost-effective monitoring of large micro- and meso-litter in tidal and flood accumulation zones at south-western Baltic Sea beaches. *Mar. Pollut. Bull.* 149, 2019. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110544.
19. *Balčiūnas A.* Marine litter pollution at the Lithuanian open sea and coastal areas. Doctoral dissertation, Klaipėda University, 2018. 116 p.
20. *Haseler M., Schernewski G., Balciunas A., Sabaliauskaitė V.* Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches. *J. Coast. Conserv.* 22. 2018. P. 27—50. doi: 10.1007/s11852-017-0497-5.

21. Tukey J.W., 1977. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Publishing Company Reading, Mass. — Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney. XVI. 688 p. doi: 10.1002/bimj.4710230408.

References

1. UNEP, 2009. Marine Litter: A Global Challenge. UNEP, Nairobi: 232.
2. Cauwenberghe, L., Claessens, M., Vandegehuchte, M.B., Mees J. Assesment of marine debris on the Belgian Continental Shelf. Marine Pollution Bulletin 73. 2013: 161—169. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.05.026.
3. GESAMP. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: A Global Assessment. 2015.
4. Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North. Marine Pollution Bulletin. 2001, Dec. 42(12):1297—300. doi: 10.1016/s0025-326x(01)00114-x.
5. UNEP, GRID (2016) Marine Litter Vital Graphics: United Nations Environment Programme and GRID-Arendal. www.unep.org, www.grida.no.
6. Esyukova E.E., Chubarenko I.P. Microplastics in the water column, bottomsediments, and a beach sands of the southeastern Baltic sea: concentrations, particle distributions by size and shape. *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2019. 2 (56): 1—14. [In Russian]. doi: 10.30694/1026-6500.
7. Aniansson B., Bell G., Fátima B., Dagevos J., Elliot B., Fleet D.M., Guéna A., Hägerhäll B., Jørgensen H.H., Kerckhof F., Mourinho F.L., Nickerson R., Nilsson P., Olin R., Span I., Sverrisdóttir S., Wenneker B. OSPAR Pilot Project on Monitoring Marine Beach Litter: Monitoring of marine litter in the OSPAR region Carson HS, Colbert SL, 2007.
8. Oosterhuis F., Papyrakis E., Boteler B. Economic instruments and marine litter control. Ocean & Coastal Management. 2014. 102: 47—54. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2014.08.005.
9. Esyukova E.E., Chubarenko I.P. Features of the distribution of microplastics on sandy beaches of the Kaliningrad region (the Baltic sea). *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2018. 1 (51): 108—121. [In Russian]. doi: 10.30694/1026-5600-2018-1-108-121.
10. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of the Kaliningrad region, Russia. 2017. Mar. Pollut. Bull. 114: 1072—1080. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.10.001.
11. Lobchuk O.I., Kilesa A.V. Assessment of the pollution in the southeastern Baltic sea by plastics litter (OSPAR method). *Problemy regional'nogo razvitiya v nachale XXI veka*. Problems of regional development at the beginning of the XXI century. 2019: 253—259. [In Russian].
12. Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. Mar. Pollut. Bull. 108. 2016: 105—112. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048.
13. Balčiūnas A., Blažauskas N. Scale, origin and spatial distribution of marine litter pollution in the Lithuanian coastal zone of the Baltic Sea. *Baltica*. 2014. doi: 10.5200/baltica.2014.27.14.
14. OSPAR, 2010. OSPAR Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beach in the OSPAR Maritime Area, Agreement Number 2010-02: 84. Availableat: www.ospar.org. (accessed June 2017).
15. Gago J., Galgani F., Maes T., Thompson R.S. Microplastics in seawater: recommendations from the marine strategy framework directive implementation process. *Front. Mar. Sci.*, 3. 2016. doi:10.3389/fmars.2016.00219.
16. Schultz C., Powell K., Crossley A. Analytical approaches to support current understanding of exposure, uptake and distributions of engineered nanoparticles by aquatic and terrestrial organisms. *Ecotoxicology* 24. 2015: 239—261. doi: 10.1007/s10646-014-1387-3.
17. Schernewski G., Balciunas A., Gräwe D., Gräwe U., Klesse K., Schulz M., Wesnig S., Fleet D., Haseler M., Möllman N., Werner S. Beach macro-litter monitoring on southern Baltic beaches: results, experiences and recommendations. *J. Mar. Coast. Conserv.* 2. 2018: 5—25. doi: 10.1007/s11852-016-0489-x.
18. Haseler M., Weder C., Buschbeck L., Wesnig S., Schernewski G. Cost-effective monitoring of large micro- and meso-litter in tidal and flood accumulation zones at south-western Baltic Sea beaches. *Mar. Pollut. Bull.* 149. 2019. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110544.
19. Balčiūnas A. Marine litter pollution at the Lithuanian open sea and coastal areas. Doctoral dissertation, Klaipėda University. 2018: 116.

20. Haseler M., Schernewski G., Balciunas A., Sabaliauskaite V. Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches. J. Coast. Conserv. 22. 2018: 27—50. doi: 10.1007/s11852-017-0497-5.
21. Tukey J.W. 1977. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Publishing Company Reading, Mass. — Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney, XVI. 688. doi: 10.1002/bimj.4710230408.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 09.04.2020

Принята после доработки к публикации 05.10.2020

Сведения об авторах

Лобчук Ольга Ивановна, младший научный сотрудник, Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, olga_may87@mail.ru.

Килесо Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры географии океана Балтийского федерального университета им. И. Канта, aleksandr.kiles@gmail.com.

Informations about authors

Lobchuk Olga Ivanovna, Junior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences.

Kiles Alexander Vladimirovich, Senior Lecturer, Department of Geography of the Ocean of the Immanuel Kant Baltic Federal University.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК 551.467:[656.61.052:656.085.3](09)

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-534-546

О теории миража, погубившего «Титаник»

Е.В. Несмеянов

Санкт-Петербург, ampix@list.ru

Подвергаются критическому разбору основные положения популярной теории миража, известной из публикаций и телепрограмм Тима Малтина, которая пытается объяснить столкновение п/х «Титаник» с дрейфующим айсбергом незадолго до полуночи 14 апреля 1912 г. экстраординарным (а возможно, уникальным) сочетанием атмосферных условий в районе катастрофы на стыке Гольфстрима и Лабрадора (фронтальная зона Гольфстрима). На основе работ М. Зинковой и других авторов вскрываются противоречия, ошибки и неточности в публикациях и методологии Малтина и сторонников «атмосферной версии» гибели «Титаника». Обосновывается несостоятельность этой теории как с позиций исторической науки, так и на основе данных современных метеорологических исследований. Предлагается альтернативное объяснение возможных причин, в силу которых айсберг на пути следования судна не был замечен вовремя для совершения маневра уклонения с учетом реально сложившихся тогда условий. Приводится ряд малоизвестных для российских читателей фактов.

Ключевые слова: атмосферная рефракция, «Титаник», история морских катастроф.

On the mirage theory of the *Titanic* disaster

E. V. Nesmeyanov

Saint Petersburg, Russia

The article critically examines the main provisions of the popular mirage theory of the *Titanic* disaster that is best known from Tim Maltin's publications and television shows attempting to explain the collision of the ship with a drifting iceberg on April 14, 1912 by an extraordinary (and possibly unique) combination of atmospheric conditions in the border area of the North Atlantic Ocean where the Gulf Stream and the Labrador Currents meet (the Gulf Stream frontal zone). The testimonies of the two surviving lookouts are analyzed, along with the readings of the nearby ships' log books. Different types of errors, inaccuracies and contradictions are revealed in the publications of Maltin and other proponents of the "atmospheric version" of the sinking of *Titanic*, based on research carried out by Mila Zinkova and others. Another types of detected flaws are those of methodological nature (uncritical use of evidence, tendentious interpretations, improper extrapolation of data, etc). The inconsistency of the mirage theory is being substantiated both from the standpoint of historical science and based on modern meteorological studies. An alternative explanation is proposed for the possible reason why the iceberg was not spotted on the path of the vessel in time to avoid it, taking into account the actual conditions that were present on the night of the disaster.

This article is a translated review of this author's extended paper "Titanic's Mirage: Case Closed" written under the scientific supervision of Mila Zinkova and published (in two parts) in the quarterly official journal of The British Titanic Society, the *Atlantic Daily Bulletin*, in the fall and winter of 2020. Published for the first time in Russian.

Keywords: atmospheric refraction, *Titanic*, history of maritime disasters.

For citation: *E. Nesmeyanov. On the mirage theory of the Titanic disaster. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 61: 534—546. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-534-546*

Введение

За более чем сто лет, минувших с момента гибели «Титаника» в водах Северной Атлантики в ночь с 14 на 15 апреля 1912 г., история его изучения на Западе знала немалое число экстравагантных, а подчас и курьезных версий, пытающихся вскрыть «истинные» причины — или даже найти оправдание — одной из крупнейших (1496 погибших) и самых знаменитых морских катастроф. В последние годы поиски этих причин все чаще ведутся в области неких причудливых и непреодолимых сил природы; также рассматривается возможность воздействия небесных тел (Луны, Солнца).

Теория миража, или сверхрефракции, выделяется в этом ряду как наиболее претенциозная, наукоемкая и пользующаяся самой широкой поддержкой на телевидении, в СМИ и Интернете, включая Рунет. Британский исследователь «Титаника» и телеведущий Тим Малтин, автор электронной книги [1], стал ее главным идеологом и пропагандистом. Известные американские научно-популярные телеканалы Smithsonian Channel (принадлежащий Смитсоновскому институту) и National Geographic включились в продвижение «революционной» теории. Благодаря агрессивному промоушену армия ее сторонников по всему миру к настоящему времени насчитывает тысячи, а возможно, десятки и сотни тысяч человек.

Целью настоящей статьи является критический разбор теории миража Т. Малтина на основе научных публикаций западных исследователей, в том числе с использованием гидрометеорологических данных, а также вскрытие допущенных указанным автором ошибок (фактологических и методологических) и противоречий. Расширенная научно-популярная версия статьи увидела свет (в двух

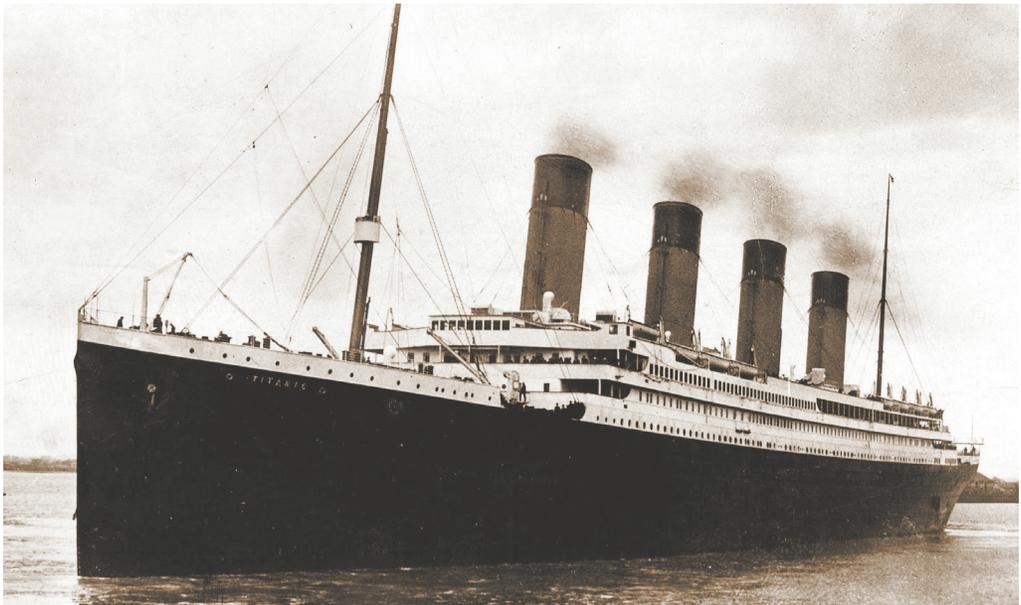


Рис. 1. «Титаник» выходит из Саутгемптона. Англия, 10 апреля 1912 г. (Wikimedia Commons).

Fig. 1. *Titanic* leaving Southampton. England, on 10 April 1912.

частях) в журнале Британского общества «Титаника» *The Atlantic Daily Bulletin* (на англ. языке) осенью и зимой 2020 г.

1. Из истории вопроса

Несмотря на громкие эпитеты («революционная» теория) и отсутствие в работе [1] обзора публикаций по проблеме, теория миража отнюдь не является новой, а Малтин не стоит у ее истоков. При этом мы не находим никаких упоминаний о мираже в протоколах свидетельских показаний, полученных в ходе американского и британского расследований по делу о гибели «Титаника» весной—летом 1912 г. И это странно, принимая во внимание усилия отдельных лиц для поиска любых возможных объяснений несвоевременного обнаружения айсберга, с которым столкнулся лайнер¹.

По-видимому, самое раннее упоминание рефракции в данном контексте относится к 1961 г., когда некий капитан Куик, сотрудник британского Министерства торговли, допустил вероятность надвигающегося явления преломления (*looming*), благодаря которому палубные и навигационные огни тонущего «Титаника» казались находящимися ближе, чем это было в действительности, наблюдателям с борта грузопассажирского парохода «Калифорниан», лежавшего в дрейфе в 12—14 морских милях к северу [2, с. 192—193].

Официальное обнаружение обломков корпуса «Титаника» совместной франко-американской экспедицией 1985 г. более чем в 13 милях к юго-востоку от сообщавшихся в радиограммах координат места бедствия вызвало пересмотр «дела “Калифорниана”» подразделением по расследованию морских происшествий (МАИВ) британского департамента транспорта в 1992 г. В опубликованном отчете [3] аномальной рефракции отводилась довольно значительная роль, и опять же рассматривалась возможность существования в ночь гибели «Титаника» сверхрефракционных условий, позволяющих наблюдать объекты (в частности, судовые огни), находящиеся за пределами зоны геометрической видимости.

Идеи, изложенные в отчете МАИВ, вскоре проникли и в научно-популярную литературу. Капитан береговой охраны США Дэвид Г. Браун [4, с. 57] выражает изрядную степень уверенности в том, что впередсмотрящие и вахтенные офицеры «Титаника» оказались «введены в заблуждение призрачными миражами». Брауну вторит капитан Л.М. Коллинз, лоцман порта Сент-Джонс и других портов Ньюфаундленда, в [5].

Подлинный революционизм Малтина состоит в придании им чрезвычайного значения той роли, которую, согласно его убеждению, сыграла сверхрефракция при столкновении «Титаника» с айсбергом около 23:40 14 апреля 1912 г. (по судовому времени). Он декларирует: «“Титаник” затонул в центре “идеального шторма” атмосферных условий, способствующих как повышенной видимости, так и аномальной рефракции» [1, с. 55]. В его версии ледяная гора якобы оказалась

¹ Например, старший из выживших офицеров, второй помощник капитана «Титаника» Ч.Г. Лайтоллер стал автором популярного мифа о так называемом темном, или перевернувшимся айсберге (при том что собственными глазами он айсберга не видел). Подробнее об этом см. приложение 2 в [11].



Рис. 2. Мираж типа фата-брумоза с туманной «стеной» на горизонте. «Стена» в действительности является увеличенным по вертикали отображением участка поверхности моря (увеличенный фрагмент фото М. Зинковой, 2017 г.).

Fig. 2. A Fata Brumosa display with the “wall” at the horizon. The “wall” is actually a vertically enlarged representation of a section of the sea surface (photo by Mila Zinkova, 2017, zoomed).

закамуфлирована визуально приподнявшейся линией ложного горизонта, утратив контрастность на фоне туманной «стены», в результате чего айсберг был замечен слишком поздно для совершения экстренного «маневра последнего момента».

Критика этой теории в 2012—2014 гг. носила преимущественно несистематический характер и почти сразу же ушла в специализированные научные издания и блоги ([6, 7] и др.). Массовая аудитория, таким образом, осталась практически в полном неведении относительно вопросов и претензий академического сообщества к научной состоятельности теории сверхрефракции.

Наиболее полный научный анализ и систематическое опровержение теоретических выкладок Малтина были предприняты Милой Зинковой (Сан-Франциско) в статье из четырех частей *Titanic’s mirage* («Мираж “Титаника”») для журнала *Weather* Королевского метеорологического общества Великобритании (апрель — август 2019 г.) ([8, 9] и др.).

2. Свидетельства впередсмотрящих «Титаника»

Доказательная база Малтина сводится к трем главным линиям: 1) устные и письменные свидетельства очевидцев (пассажиров и членов экипажей «Титаника» и других судов); 2) выписки из судовых журналов и иных архивных документов, содержащих метеорологические данные для представляющих интерес времени и места; 3) интерпретация этих данных (причем чаще всего выгодным для себя образом), а также сгенерированные на компьютере изображения иллюстративного характера.

Поскольку речь идет о выяснении обстоятельств, воспрепятствовавших — или якобы воспрепятствовавших — своевременному обнаружению айсберга по курсу следования «Титаника», то свидетельским показаниям его впередсмотрящих (матросов, выполнявших роль своеобразных «глаз судна» и несших вахту в «вороньем гнезде» на фок-мачте во время столкновения) уделяется повышенное внимание.

Впередсмотрящий Реджинальд Ли отличился в ходе следствия особой настойчивостью в продвижении версии с туманом или дымкой. По его словам, ночь крушения «Титаника» была ясной, звездной, безлунной и безветренной, но только поначалу. «Во время аварии мы имели прямо по курсу туманную дымку (haze), простиравшуюся более или менее вдоль всего горизонта». Ли утверждал, что его вахтенный напарник Фредерик Флит якобы даже обронил ремарку: «Нам повезет, если мы что-нибудь разглядим» в этой дымке. Однако сам Флит отрицал, что произнес такие слова, и это ставит под сомнение достоверность показаний Ли. Так или иначе, в описании последнего айсберг предстает в виде темной массы, которая появилась у них на пути, разорвав пресловутую туманную пелену [10, с. 72—73].

Флит, первым из них заметивший айсберг, подтверждал наличие «легкой дымки» (slight haze), стелившейся над водой со второй половины их вахты, но дымка эта, по его оценке, простиралась не более чем на два румба в сторону каждого борта, никоим образом не мешала им в наблюдении за горизонтом и в целом «о ней нечего было и говорить» [10, с. 410].

Из показаний Ли и Флита Малтин извлекает то, что ему нужно, и производит на свет свою собственную, комбинированную версию «легкой дымки по всему горизонту». «Впередсмотрящие “Титаника”, — пишет он, — свидетельствовали, что роковой айсберг показался им выходящим из этой дымки в последний момент» [1, с. 34]. Но даже эта малтиновская дымка, полученная путем произвольного комбинирования частей двух разных свидетельств, не соответствует тому, что может наблюдаться при мираже типа фата-брумозы, поскольку айсберг, как нам теперь известно, был замечен с борта «Титаника» (из «вороньего гнезда» либо с капитанского мостика) с дистанции от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{2}$ мили [11, с. 175—176]; он никак не мог появиться «в последний момент», разорвав полосу миражной дымки, которая должна была тянуться по самому краю горизонта на удалении в несколько миль.

Свидетельства других очевидцев — членов экипажей и пассажиров «Титаника», «Калифорниана» и «Карпатии», озвученные в ходе расследований или

опубликованные в изданиях мемуарного характера, — столь же противоречивы и не позволяют однозначно подтвердить или опровергнуть присутствие какого-либо тумана или дымки в ночь крушения¹.

3. Данные судовых журналов п/х «Траутенфельс» и «Маренго»

Второй помощник капитана «Титаника» Ч.Г. Лайтоллер свидетельствовал, что за два часа его вахты, с 19:00 до 21:00 в воскресенье 14 апреля, температура воздуха, постепенно понижавшаяся в течение всего вечера, упала почти на шесть градусов — до +1 °С; температура воды была немногим выше: +2 °С (он отрицал, что это можно расценивать как сигнал близости большого скопления льдов)² [10, с. 305].

За неимением данных по «Титанику» после 21:00 в литературе принято обращаться к выписке из судового журнала п/х «Калифорниан», остановившегося на ночь у кромки ледового поля севернее тонувшего «Титаника» (таблица).

Таблица

Температура воздуха и воды 14—15 апреля 1912 г. по результатам замеров, произведенных с борта п/х «Калифорниан» [12, с. 1142]

Temperature readings from the log book of the S.S. *Californian*, April 14/15, 1912

Судовое время	<i>T</i> воздуха, °F (°C)	<i>T</i> воды, °F (°C)
<i>14 апреля</i>		
Полдень	50 (10)	56 (13,3)
16:00	37 (2,8)	36 (2,2)
20:00	30 (-1,1)	32 (0)
Полночь	27 (-2,8)	28 (-2,2)
<i>15 апреля</i>		
4:00	29 (-1,7)	29 (-1,7)
6:00	—	—
Полдень	38 (3,3)	31 (-0,6)

Как видно из таблицы, во время, близкое к моменту столкновения «Титаника» с айсбергом, температура воздуха составляла -2,8 °С, температура воды была равна -2,2 °С (ее замерзанию препятствовали содержащиеся в ней соли). Малтин

¹ Исследователями выдвигаются различные альтернативные объяснения — от испарений с поверхности самого айсберга и локализованного морского дыма, или парового тумана, до полного отрицания какой-либо дымки как продукта воображения впередсмотрящих (в особенности Р. Ли, возможно, пытавшегося таким образом защитить себя на суде). В случае принятия сценария с туманом возникает проблема: действовавшими Правилами предотвращения столкновений на море 1910 г. судам запрещалось идти полным ходом в условиях ограниченной видимости (в тумане, при снегопаде или сильном ливне). Вряд ли судоводители крупнейшего на тот момент лайнера позволили бы себе допустить столь грубое нарушение.

² На крупных океанских судах, подобных «Титанику», наблюдение за температурой воздуха и воды велось постоянно, от выхода из одного порта до прихода в другой. Замеры производились через каждые два часа: за борт на веревке опускалось полотняное ведро, которым с поверхности моря зачерпывалась порция воды; затем в ведро помещали термометр. С результатами этих измерений обязательно знакомил вахтенного офицера на мостике, чтобы он мог занести их в судовый журнал.

признает, что эти данные не подтверждают наличия резкой температурной инверсии, способствующей образованию тумана, дымки и миражей, на уровне шлюпочных палуб «Калифорниана» и «Титаника». Получив консультацию по этому вопросу у д-ра Эндрю Т. Янга из Калифорнийского университета в Сан-Диего, он провозгласил: «Непонимание того, что сильная термическая инверсия все еще может существовать, но только где-то на более высоком уровне (выше шлюпочной палубы — *прим. автора*), в данной ситуации стало одной из главных причин, почему существование такой инверсии в районе гибели “Титаника” не было открыто — до этого момента» [1, с. 49].

Существование сильной приподнятой инверсии в представляющем интерес районе Малтин выводит из записей в журнале германского парохода «Траутенфельс». Утром 14 апреля тот прошел недалеко от точки, в которой спустя 14 ч произойдет столкновение «Титаника», и зафиксировал разницу в 2 °С между температурой воздуха на уровне палубы и на уровне воды (менее чем на 12 м ниже) [1, с. 48—49].

Аналогичным образом Малтин работает с данными из метеорологического журнала британского рефрижераторного судна «Маренго» компании «Уилсон Лайн», покинувшего Нью-Йорк курсом на Халл (Великобритания) 11 апреля 1912 г. Если верить Малтину, в ночь крушения «Титаника» названное судно «находилось на той же долготе, что и “Титаник”, лишь в одном градусе южнее¹, и записи в его журнале говорят о ясной, звездной ночи с очень сильной рефракцией на горизонте» [1, с. 59].

Цифровые копии страниц судового журнала «Маренго» доступны в архиве британского Метеобюро. Из них можно видеть, что в ночь с 14 на 15 апреля «сильная рефракция» (great refraction) действительно наблюдалась с борта судна; однако само оно в это время находилось на расстоянии более 170 миль к юго-западу от «Титаника». К полудню 15 апреля «Маренго» достиг точки с координатами 40°57′ с. ш., 50°29′ з. д., т. е. находился на 47 миль южнее точки, в которой затонул «Титаник» [9, с. 268]. Это стало наибольшим приближением рефрижераторного парохода к месту недавней катастрофы, но в записях, относящихся к указанному времени, рефракция не фигурирует. В следующий раз она упоминается только в 16:00 того же дня.

Утверждение Малтина о том, что п/х «Маренго» находился в одном градусе от места крушения «Титаника» *ночью с 14 на 15 апреля*, не соответствует действительности.

При использовании данных судовых журналов «Траутенфельса» и «Маренго» таким образом, как это делает Малтин, возникает проблема нерепрезентативности единичных измерений температуры для определения величины рефракции по всему региону, о чем пишет В. Е. Дементьев в [13, с. 87, 93]: поскольку атмосфера неоднородна и ее оптические свойства постоянно изменяются вследствие флуктуации метеопараметров, то коэффициенты рефракции не равны на различных направлениях; «<...> измерения градиента температуры в одной точке трассы не позволяют с достаточной точностью и достоверностью вычислять рефракцию для всей трассы, так как условия прохождения луча в различных ее точках

¹ 1° широты соответствует 60 морским милям.

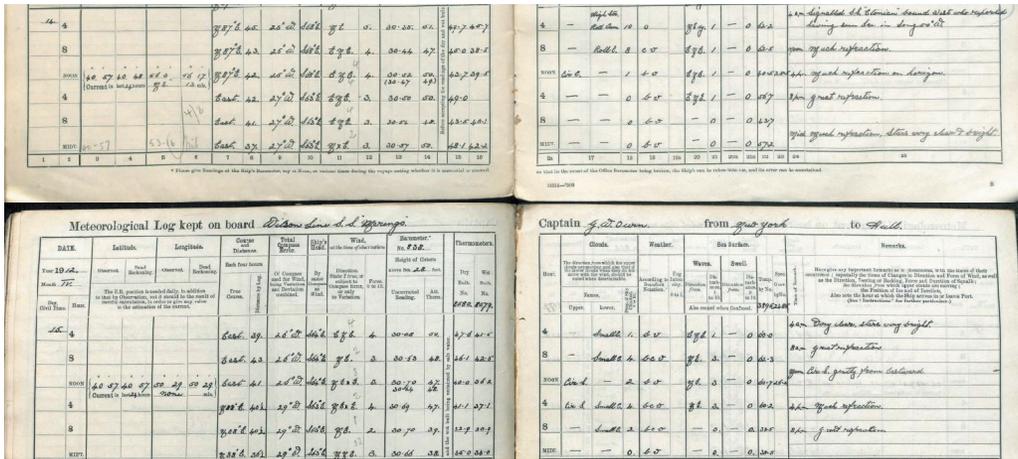


Рис. 3. Копии страниц судового журнала п/х «Маренго» с записями о состоянии погоды и видимости за 14 апреля (вверху) и 15 апреля (внизу) 1912 г. (предоставлено британским Метеобюро).

Fig. 3. Excerpts from the S.S. *Marengo's* meteorological log dated to 14 and 15 April 1912 (courtesy of the UK Met Office).

неодинаковы. <...>. Поэтому нельзя считать, что такие же условия прохождения света будут наблюдаться на других трассах и в другие моменты времени или даже для этой трассы, но в другое время».

4. Арктический антициклон

Помимо температуры воздуха и воды, Малтином анализируется еще одна важная для определения рефракции метеорологическая величина, а именно атмосферное давление в районе трагедии. И этот показатель оказывается экстремальным: «Титаник» затонул «в центре арктического антициклона с давлением 1035 гПа (или ~776 мм рт. ст. — прим. автора), что являлось максимумом для Северного полушария на то время и наивысшим показателем давления для Северной Атлантики в апреле» [1, с. 54].

По-видимому, впервые этот барический максимум был упомянут в 1992 г. в статье Роберта Паолы [14]. Изучив архивные синоптические карты, этот автор обнаружил большой, «пугающий своим присутствием» арктический антициклон с давлением в центре 1037 гПа, расположившийся «почти в точности над местом затопления “Титаника”» 15 апреля 1912 г. (цит. по [8, с. 124]).

Для верификации этого утверждения М. Зинкова воспользовалась массивом данных совместного проекта реанализа за период XX века (20CR) Национального управления океанических и атмосферных исследований и Кооперативного института исследований в области наук об окружающей среде США (NOAA—CIRES) [15]. На полученных ею картах (рис. 4 и 5) за 48 и 24 ч до столкновения арктический антициклон в районе катастрофы отсутствует. Ко времени

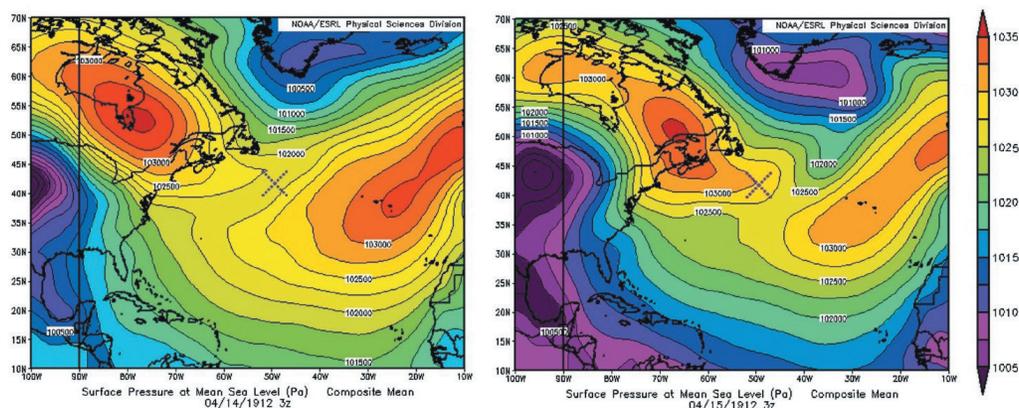


Рис. 4. Синоптическая ситуация по состоянию на 14—15 апреля 1912 г. Карты составлены М. Зинковой по данным проекта реанализа за период XX века (NOAA — CIRES).

Слева — примерно за 24 ч до столкновения;
справа — около полуночи. Место крушения отмечено синим крестом.

Fig. 4. Synoptic situation at (top) 0300 GMT on 14 April 1912, around 24 hours before the collision, and (bottom) about the time of the collision. A blue cross marks the location of the disaster.

The plots were created by Mila Zinkova using the NOAA-CIRES Reanalysis Project dataset.

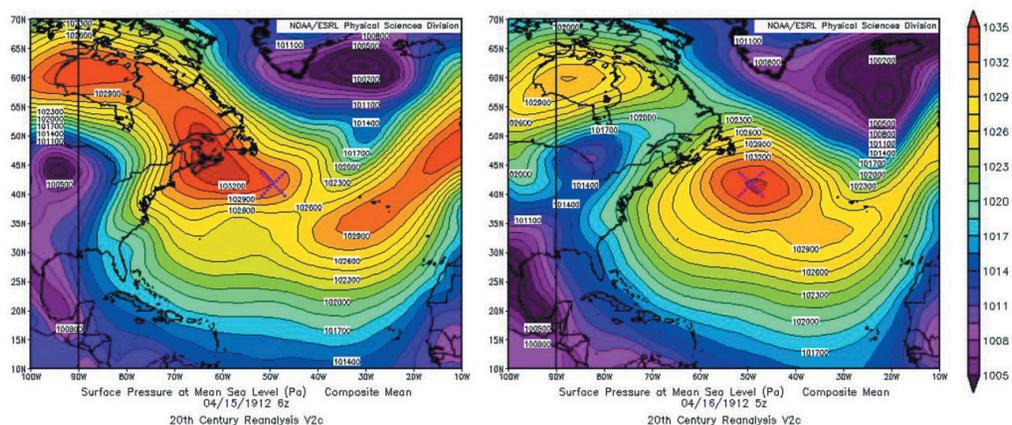


Рис. 5. Синоптическая ситуация по состоянию на 15—16 апреля 1912 г. Карты составлены М. Зинковой по данным проекта реанализа за период XX века (NOAA — CIRES).

Слева — приблизительно через 40 мин после погружения «Титаника» под воду;
справа — спустя 24 ч после катастрофы.

Fig. 5. Synoptic situation at (right) 0600 GMT on 15 April 1912, about 40 minutes after *Titanic* sank, and (left) 24 hours after the sinking.

The plots were created by Mila Zinkova using the NOAA-CIRES Reanalysis Project dataset.

столкновения восточный край области повышенного давления достигает координат места происшествия, однако его центр по-прежнему находится на некотором удалении. Когда центр антициклона наконец накрыл собой место крушения «Титаника» 15 апреля, он оставался там практически в течение следующих 24 ч, таким образом «словно воздавая свою дань памяти погибших» [8, с. 125].

Заключение

Методы работы Малтина с историческим материалом (документами и свидетельствами очевидцев) отличаются крайней произвольностью и селективностью («cherry picking»), экстраполяции данных неправомерны, а их интерпретации тенденциозны. Отстаиваемая Малтином теория, призванная объяснить одну из крупнейших и самых дискутируемых катастроф в истории мореплавания, парадоксальным образом оставляет больше вопросов, чем дает ответов.

Описываемые им условия — при температуре воды немногим выше температуры воздуха в приводном слое атмосферы — можно признать более благоприятными для формирования нижнего миража. В то же время попытки доказать существование температурной инверсии на уровне выше шлюпочной палубы говорят в пользу верхнего миража по типу фата-морганы или фата-брумозы. Однако, как замечает М. Зинкова, фата-брумоза образуется в тех случаях, когда температурная инверсия начинается на уровне поверхности моря или чуть выше нее, так что инверсия на более высоком уровне не приведет к формированию этого оптического явления [8, с. 121].

Положения теории Малтина не находят опоры и в геометрии. При наблюдении с высоты «вороньего гнезда» «Титаника» (около 27 м над ватерлинией, тогда как высота айсберга составляла порядка 20 м) большая часть ледяной горы, казавшейся темной в условиях океанской ночи, должна была теряться на фоне черноты океана, а не горизонта за ней. На это британской следственной комиссии указывал полярный исследователь Эрнест Шеклтон [10, с. 720].

Еще одно опровержение было получено в 2014 г. с использованием современного компьютерного моделирования и данных реанализа 20CR группой американских физиков и метеорологов под руководством д-ра С. Басу (Государственный университет Северной Каролины). Высокоточная компьютерная реконструкция метеорологических и оптических условий в районе крушения за период начиная с 12 апреля 1912 г. показала близкую к нулевой разность температуры воздуха и температуры воды в момент столкновения, что не могло способствовать возникновению условий сверхрефракции для означенного места и времени [6, с. 3—5, 7].

С помощью этой же модели признаки формирования таких условий в рассматриваемой области были отмечены за несколько часов до столкновения, ранним утром 14 апреля. Согласно выводам данного исследования [6, с. 4, 7], зафиксированное Ч.Г. Лайтоллером и другими свидетелями резкое понижение температуры вечером 14 апреля было вызвано активным наступлением полярного фронта, вытеснившего наверх весь теплый воздух. Можно утверждать, что это не только ослабило температурную инверсию, но и помешало «Титанику» встретиться с явлениями атмосферной рефракции.

Обращение к анналам истории судоходства также не выявляет фактов в поддержку версии с миражом. Прецедентов подобного рода – аварий и тем более катастроф судов, вызванных рефракционными явлениями в ледовых регионах Мирового океана, — автором настоящей статьи не обнаружено¹. В изложении Малтина столкновение «Титаника» с якобы скрытой миражом дрейфующей ледяной горой приобретает черты поистине уникального, не имеющего аналогов исторического события.

С учетом всех реально имевшихся на тот момент условий (дальность видимости из «вороньего гнезда» и с мостика, полный штиль с отсутствием волнового движения воды и, соответственно, «светящегося прибоя» у подножия айсберга, отсутствие луны, чрезмерно высокая скорость хода судна (около 22,5 узлов) в ночное время в опасной ледовой зоне) следует признать, что айсберг был замечен тогда, когда он мог быть замечен: в пределах расстояния от четверти до двух (максимум трех) миль. Теоретически он мог быть замечен раньше, чем это произошло в действительности, но также его могли заметить и еще позже. В любом случае при наблюдении с высоты шлюпочной палубы или «вороньего гнезда» «Титаника», как уже говорилось, большая часть надводного тела айсберга «растворялась» на фоне темного океана; визуально расположенная ниже линии видимого горизонта, она оставалась вне досягаемости для каких бы то ни было явлений, реальных или воображаемых, на горизонте [16].

Для объяснения факта столкновения «Титаника» с айсбергом, памятью о принципе бритвы Оккама, нет необходимости прибегать к сложным умозрительным теориям и ссылаться на необычные оптические явления в атмосфере ночью с 14 на 15 апреля 1912 г. Современными историческими и метеорологическими исследованиями теория миража не подтверждается.

Благодарности

Автор выносит благодарность Миле Зинковой за предоставленные материалы и научное руководство в процессе работы над статьей Titanic's Mirage: Case Closed, д-ру Эндрю Т. Янгу и В.Е. Дементьеву за ценные консультации, а также Д.С. Брыкову, Роджеру Бриджесу, библиотеке и архиву Британского метеобюро.

Acknowledgments

The author expresses his gratitude to Mila Zinkova for the provided materials and scientific guidance during the work on the paper "Titanic's Mirage: Case Closed",

¹ Не принесло результатов и обращение в британское Подразделение по расследованию морских происшествий (МАИВ). К настоящему моменту в его базе данных зарегистрировано свыше 45 тыс. аварийных происшествий начиная с 1991 г., но ни в одном из этих случаев рефракция или мираж не выступили в качестве причин аварии (информация любезно предоставлена главой администрации МАИВ Роджером Бриджесом). В годы Второй мировой войны военные моряки сталкивались с явлениями рефракции, но это не приводило ни к каким серьезным последствиям. Единственное обнаруженное в литературе упоминание о нескольких посадках на мель и кораблекрушениях, спровоцированных миражом, относится к знаменитому «кладбищу Атлантики» напротив мыса Гаттерас.

to Dr. Andrew T. Young and V.E. Dementiev for valuable consultations, as well as to D.S. Brykov, Roger Brydges and the National Meteorological Library and Archive (UK Met Office).

Список литературы

1. *Maltin T. Titanic: A Very Deceiving Night* eBook. UK: Malt House Books, 2012. 199 p. URL: <https://www.amazon.com/Titanic-Deceiving-Night-Tim-Maltin-ebook/dp/B007W6LI4M> (дата обращения: 23.11.2020).
2. *Lee P. The Titanic and the Indifferent Stranger: The Complete Story of the Titanic and the Californian*. US: CreateSpace Independent Publishing Platform, 201. 296 p.
3. *RMS Titanic: Reappraisal of Evidence Relating to SS Californian*. Marine Accident Investigation Branch. Dept. of Transport. London: HMSO, 1992. 30 p.
4. *Brown D.G. The Last Log of the Titanic: What Really Happened on the Doomed Ship's Bridge?* US: International Marine/McGraw-Hill, 2001. 234 p.
5. *Collins L.M. The Sinking of the Titanic – The Mystery Solved*. UK: Souvenir Press, 2009. 198 p.
6. *Basu S., Nunalee C.G., He P. et al. Reconstructing the prevailing meteorological and optical environment during the time of the Titanic disaster. Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans III. SPIE Proceedings*. 2014. V. 9224. P. 1—10. doi: 10.1117/12.2063195.
7. *Davidson W. Titanic case closed?? I don't think so... // Extremely High Horizon Refraction*. April 10–14, 18, 25, 2012. URL: http://www.eh2r.com/old/index_pop_ups/index_2012.html (дата обращения: 28.09.2020).
8. *Zinkova M. Titanic's mirage. Part 1. The enigma of the Arctic High and a cold-water tongue of the Labrador Current // Weather*. 2019. V. 74, No. 4. P. 119—128. doi: 10.1002/wea.3243.
9. *Zinkova M. Titanic's mirage. Part 4. How might currents have affected visibility and the rescue operation? // Weather*. 2019. V. 74, No. 8. P. 264—270. doi: 10.1002/wea.3431.
10. *Formal investigation into the loss of the S. S. Titanic. Evidence, appendices and index. Wreck Commissioner's Court*. London: His Majesty's Stationery Office, 1912. 959 p. URL: www.titanicinquiry.org.
11. *Несмеянов Е.В. «Титаник»: правда и мифы. Новейшие исследования*. М., СПб.: Нестор-История, 2020. 320 с.
12. *United States Senate. 62nd Congress, 2nd Session (1911–1912). Report No. 806: Titanic Disaster. Hearings of a Subcommittee of the Committee on Commerce pursuant to S. Res. 283, directing the Committee on Commerce to investigate the causes leading to the wreck of the White Star liner Titanic*. Washington, DC: US Government Printing Office, 1912. 1163 p. Режим доступа: www.titanicinquiry.org.
13. *Деметьев В.Е. Рефракция и миражи*. М.: Геодезия и Строительство, 2009. 392 с.
14. *Paola R. Weather and the Titanic // Weatherwise Magazine*. 1992. V. 45, No. 2. P. 17—19. doi: 10.1080/00431672.1992.9925915.
15. *Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project // Quarterly J Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137, No. 654. P. 1—28. doi: 10.1002/qj.776.
16. *Halpern S. Encounter in the Night // Titanicology*. 2017. URL: <http://www.titanicology.com/Titanica/EncounterInTheNight.htm> (дата обращения: 15.11.2020).

References

1. *Maltin T. Titanic: A Very Deceiving Night* eBook. UK: Malt House Books, 2012: 199 p. URL: <https://www.amazon.com/Titanic-Deceiving-Night-Tim-Maltin-ebook/dp/B007W6LI4M>.
2. *Lee P. The Titanic and the Indifferent Stranger: The Complete Story of the Titanic and the Californian*. US: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012: 296 p.
3. *RMS Titanic: Reappraisal of Evidence Relating to SS Californian*. Marine Accident Investigation Branch. Dept. of Transport. London: HMSO, 1992: 30 p.
4. *Brown D.G. The Last Log of the Titanic: What Really Happened on the Doomed Ship's Bridge?* US: International Marine. McGraw-Hill, 2001: 234 p.
5. *Collins L.M. The Sinking of the Titanic – The Mystery Solved*. UK: Souvenir Press, 2009: 198 p.

6. Basu S., Nunalee C.G., He P. et al. Reconstructing the prevailing meteorological and optical environment during the time of the *Titanic* disaster. *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans III*. SPIE Proceedings. 2014, 9224: 1—10. doi: 10.1117/12.2063195.
7. Davidson W. *Titanic* case closed?? I don't think so... Extremely High Horizon Refraction. April 10–14, 18, 25, 2012. URL: http://www.eh2r.com/old/index_pop_ups/index_2012.html.
8. Zinkova M. *Titanic's* mirage, part 1: The enigma of the Arctic High and a cold-water tongue of the Labrador Current. *Weather*. 2019, 74 (4): 119—128. doi: 10.1002/wea.3243.
9. Zinkova M. *Titanic's* mirage. Part 4. How might currents have affected visibility and the rescue operation? *Weather*. 2019, 74 (8): 264—270. doi: 10.1002/wea.3431.
10. Formal investigation into the loss of the S. S. *Titanic*. Evidence, appendices and index. Wreck Commissioner's Court. London: His Majesty's Stationery Office, 1912: 959 p. URL: www.titanicinquiry.org.
11. Nesmeyanov E. *Titanic: Pravda i mify. Noveishchie issledovaniya. Titanic: Truth and Myths. The Newest Research*. Moscow / Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2020: 320 p. [In Russian].
12. United States Senate. 62nd Congress, 2nd Session (1911—1912). Report No. 806: *Titanic* Disaster. Hearings of a Subcommittee of the Committee on Commerce pursuant to S. Res. 283, directing the Committee on Commerce to investigate the causes leading to the wreck of the White Star liner *Titanic*. Washington, DC: US Government Printing Office, 1912: 1163 p. Available online: www.titanicinquiry.org.
13. Dementiev V.E. *Refrakciya i mirazhi*. Refraction and mirages. Moscow: Geodeziya i Stroitel'stvo. 2009: 392 p. [In Russian].
14. Paola R. Weather and the *Titanic*. *Weatherwise Magazine*. 1992, 45 (2): 17—19. doi: 10.1080/00431672.1992.9925915.
15. Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., et al. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011, 137 (654): 1—28. doi: 10.1002/qj.776.
16. Halpern S. Encounter in the Night. *Titanicology*. 2017. URL: <http://www.titanicology.com/Titanica/EncounterInTheNight.htm>.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 14.09.2020
Принята к публикации 16.11.2020*

Информация об авторе

Несмеянов Евгений Владимирович, выпускник философского факультета СПбГУ, писатель, исследователь катастроф «Титаника» и «Адмирала Нахимова», e-mail: ampix@list.ru.

Information about the author

Nesmeyanov Evgeny Vladimirovich, graduate of the Faculty of Philosophy of St. Petersburg State University, author, researcher of the *Titanic* and *Admiral Nakhimov* disasters.

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-547-548

Конгресс «Россия в Арктическом совете. Потенциал Санкт-Петербурга» и форум «Доступная Арктика»

Конгресс «Россия в Арктическом совете. Потенциал Санкт-Петербурга» является профессиональной площадкой для обсуждения инициатив и продвижения передовых технологий по развитию Арктической зоны Российской Федерации. В рамках конгресса прошли стратегические сессии, направленные на обсуждение



Директор Департамента науки, технологий и инноваций РГГМУ Игорь Геннадьевич Мясников, специалист по защите информации 1 категории Михаил Филиппович Нестеренко, помощник ректора по вопросам Арктики Яна Евгеньевна Бразовская, заместитель директора Представительства РГГМУ в г. Москве Андрей Александрович Брыксенков.

перспектив развития арктического туризма и кадровой политики Санкт-Петербурга при подготовке специалистов для работы в Арктической зоне.

Первый международный арктический медиа-конгресс на базе форума «Доступная Арктика», состоявшийся 18 сентября в Таврическом дворце Санкт-Петербурга, стал площадкой для взаимодействия СМИ с представителями федеральных и региональных органов власти, лидеров индустрии туризма, научного сообщества и всех заинтересованных организаций, способствующих развитию Арктического региона.

Данные мероприятия были посещены сотрудниками РГГМУ в рамках подготовки к международной научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ», запланированной на 22—24 октября 2020 г.

В рамках подготовки председательства России в Арктическом совете в 2021 г. проходит ряд мероприятий по сбалансированному продвижению устойчивого развития с акцентом на социально-экономическое измерение.

РГГМУ на Всероссийском форуме «Устойчивое развитие»

24 сентября 2020 г. состоялось открытие форума «Устойчивое развитие северных территорий России».

Форум прошел в конференц-центре «PARKINN Рэдиссон Прибалтийская». В пленарном заседании участвовали: председатель Законодательного собрания Санкт-Петербурга Вячеслав Макаров, губернатор Санкт-Петербурга Александр Беглов, председатель высшего совета «Единой России» Борис Грызлов, первый заместитель председателя комитета по физической культуре, спорту, туризму и делам молодежи Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации Вячеслав Фетисов, заместитель министра природных ресурсов и экологии Российской Федерации Елена Панова.

Вопросы, обсуждаемые на круглых столах, касались экологии и развития Севера, территориального планирования и пространственного развития страны, устойчивого развития сельских территорий и национальных целей развития и перспектив международной интеграции.

На секции «Экология и развитие Севера» выступила Яна Евгеньевна Бразовская, помощник ректора по вопросам Арктики, с докладом «Экологическая безопасность и организация судоходства по Северному морскому пути».

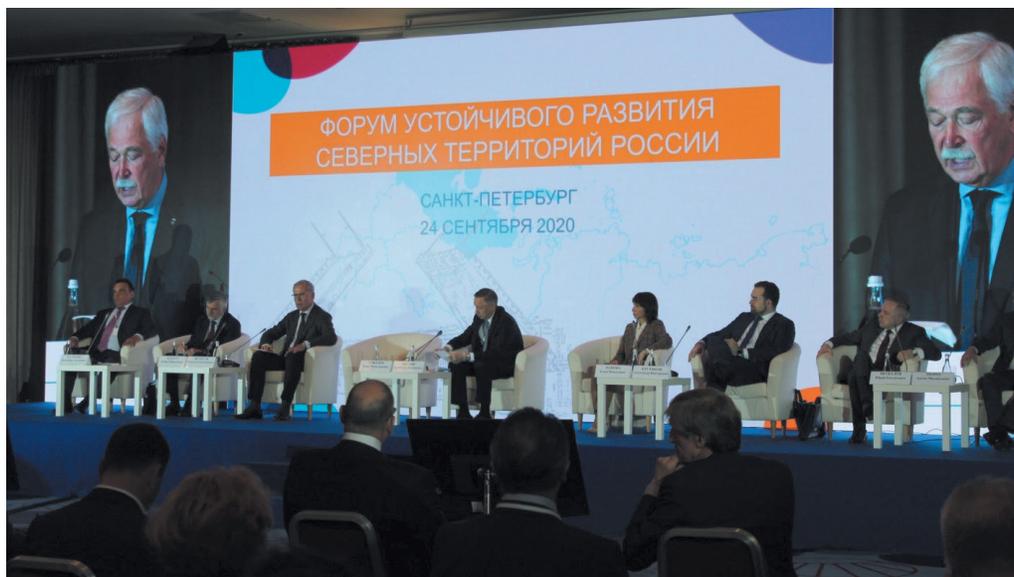


Директор представительства РГГМУ в Крыму и г. Севастополе Александр Борисович Перельман, ректор РГГМУ Валерий Леонидович Михеев, помощник ректора по вопросам Арктики Яна Евгеньевна Бразовская, проректор по развитию, и. о. проректора по научной работе Денис Валентинович Леонтьев.



Бакалавры и магистранты Экологического факультета РГТМУ.

На форуме присутствовал не только ректорат Университета, но и бакалавры и магистранты экологического факультета, для которых важно понимать взаимосвязь экологии с экономикой страны, уровнем жизни населения, развитием промышленности и арктического региона в целом.



Выступление председателя высшего совета «Единой России» Бориса Вячеславовича Грызлова.

Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ»

22—24 октября в Санкт-Петербурге прошла Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ», посвященная 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. Торжественное открытие конференции состоялось в Таврическом дворце. Организаторами конференции выступили Российский государственный гидрометеорологический университет совместно с Межпарламентской Ассамблеей стран-участников СНГ. С приветственным словом к участникам конференции обратился ректор РГГМУ Валерий Леонидович Михеев. Модератором пленарного заседания конференции выступил и. о. проректора по научной работе РГГМУ, проректор по развитию РГГМУ Денис Валентинович Леонтьев.

В ходе торжественной части конференции были зачитаны приветственные слова от члена-корреспондента РАН, специального представителя президента Российской Федерации по международному сотрудничеству в Арктике и Антарктике Артура Николаевича Чилингарова, генерального секретаря Совета МПА СНГ Дмитрия Аркадьевича Кобицкого, председателя Законодательного собрания Санкт-Петербурга Вячеслава Серафимовича Макарова, руководителя Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромет Игоря Анатольевича Шумакова, главы Республики Коми Владимира Викторовича Уйбы, губернатора Ненецкого автономного округа Юрия Васильевича Бездудного, председателя Комитета по Арктике Германа Германовича Широкова, председателя Законодательного собрания Ленинградской области Сергея Михайловича Бебенина, президента Общероссийской общественной организации «Российское гидрометеорологическое общество» Александра Ивановича Бедрицкого.

Любовь Ивановна Егорова, депутат законодательного собрания Санкт-Петербурга, Герой России, почетный гражданин Санкт-Петербурга, вручила руководству РГГМУ грамоту «За значительный вклад в развитие науки и отечественной системы высшего образования, подготовку квалифицированных специалистов, достигнутые успехи» в связи с 90-летием со дня создания.

Первый заместитель председателя Комитета по науке и высшей школе Ирина Юрьевна Ганус зачитала приветственное слово от губернатора Санкт-Петербурга Александра Дмитриевича Беглова, а также вручила почетную грамоту ректору и коллективу РГГМУ за многолетний добросовестный труд развитие науки и системы высшего образования.

Среди почетных гостей присутствовали В.В. Дмитриев (профессор СПбГУ, д-р геогр. наук, профессор кафедры прикладной системной экологии РГГМУ), В.А. Шелутко (Заслуженный эколог РФ, д-р геогр. наук), Е.Ю. Воякина (ст. научный сотрудник СПб ФИЦ РАН, канд. биол. наук) и др.



На пленарном заседании в Таврическом дворце.

На пленарном заседании конференции прозвучали следующие доклады:

1. Проблемы мониторинга транспорта и характеристик наносов в водных объектах в современных условиях. (Поздняков Шамиль Рауфович, д-р геогр. наук, профессор, директор Института озераедения РАН);

2. Актуальные проблемы системных исследований внутренних водоемов и пути их решения. (Филатов Николай Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН);

3. Трансграничные реки Казахстана: состояние, проблемы и перспективы. (Молдабаев Саркытбек Сарсембаевич, д-р юрид. наук, профессор, директор филиала Академии государственного управления при президенте республики Казахстан по Алматинской области);

4. Подготовка высококвалифицированных кадров военных метеорологов для Красной Армии в РГГМУ в годы Великой Отечественной войны. (Прямыцын Владимир Николаевич, д-р ист. наук, подполковник, зам. начальника научно-исследовательского отдела НИИ (военной истории) Военной академии Генштаба Вооруженных сил Российской Федерации);

5. Контроль, прогноз и управление качеством воздуха в континентальном, региональном и локальном масштабах. (Смышляев Сергей Павлович, профессор кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ, д-р физ.-мат. наук; Марагаева Анна Александровна, директор департамента промышленной экологии ООО «ЕИМ инжиниринг»).

Участники пленарного заседания отметили:

1. В настоящее время, в условиях вынужденного сокращения постов для наблюдений за наносами необходима организация работ по мониторингу транспорта и характеристик наносов в естественных водных объектах на новом качественном уровне. С учетом современных реалий требуемое количественное увеличение параметров, расширение диапазонов их оценки должны сочетаться с оптимизацией этих работ, активным внедрением автоматизированных систем оценки и моделирования. В связи с этим понадобится резкая активизация соответствующих научно-исследовательских разработок. В противном случае последствия недостаточного учета процессов, связанных с естественными и искусственными наносами, могут оказаться весьма серьезными, вплоть до катастрофических.

2. Для решения проблем рационального использования и охраны крупнейших внутренних водоемов России, имеющих стратегическое значение для развития экономики страны, необходима разработка и реализация комплекса мер экономического, законодательного характера, которые должны основываться на фундаментальных научных знаниях о состоянии экосистем и прогностических оценках их изменений. Опыт показал, что требуется получение экспериментальных натуральных наблюдений, совершенствование мониторинга для понимания происходящих изменений в экосистемах, а также калибрация и верификация математических моделей для полноценного информационного обеспечения интегрированных систем управления для рационального использования и охраны ресурсов крупнейших водоемов России.

3. Любые противоречия вокруг использования водных ресурсов стран Центральной Азии нужно решать через диалог властей, а водно-энергетическую проблему надо решать совместными усилиями всех стран региона на основе кооперации и взаимной выручки. Необходимо чаще применять современные водосберегающие технологии, позволяющие сэкономить до 60 % потребляемой воды, а также расширять возможности использования подземных запасов, весенних стоков, осадков.

4. Российское законодательство нуждается в дополнительной проработке положений, регламентирующих предельные концентрации опасных газов. Необходимо определить и унифицировать требования и методические указания по установлению предельных допустимых концентраций в воздухе опасных газов, исходя из степеней их опасности для жизнедеятельности, соотнося риски и прогнозы, основанные на качественном мониторинге. При этом необходимо учитывать влияние метеорологической ситуации на качество воздуха в связи с изменениями климата.

5. Необходимо модернизировать существующее российское законодательство для мотивации российских компаний в повышении экологичности производства, учитывая разработки инженерно-технологической кооперации ученых и предпринимателей, нацеленной на достижение цели по уменьшению вредных выбросов производств.

6. Зарождение системы подготовки высококвалифицированных метеорологических кадров в СССР произошло в начале 1930-х годов, а ее развитие диктовалось

интересами обеспечения народного хозяйства и обороны страны. С началом Великой Отечественной войны Главному управлению гидрометслужбы Красной Армии удалось в кратчайшие сроки переориентировать систему метеорологического образования на подготовку военных кадров. В свою очередь, опыт преподавания, накопленный в военные годы Высшим военным гидрометеорологическим институтом Красной Армии, лег в основу послевоенного обучения отечественных военных гидрометеорологических кадров.

В рамках конференции была организована работа круглых столов «Морское пространственное планирование — Дорожная карта Российской Федерации» и «Метеорология специального назначения», прошедших 23 октября в Парламентском Центре МПА СНГ, а также секций «Актуальные проблемы погоды и климата», «Гидрология и океанология от Арктики до Антарктики: теория и практика», «Экосистемы в условиях глобальных изменений», «Техносферная безопасность и информационные технологии в сфере охраны окружающей среды», «Экономико-управленческие проблемы развития общества и проблемы правового урегулирования в экосфере», «Научная коммуникация: проблемы, перспективы, формирование ключевых компетенций», прошедших на площадках Российского государственного гидрометеорологического университета. Также 23 октября в первом корпусе РГГМУ в рамках Конференции было успешно проведено заседание Учебно-методического совета по направлению подготовки «Прикладная гидрометеорология».



В кулуарах пленарного заседания.

24 октября прошла Школа-конференция молодых ученых «ЭКОГИДРОМЕТ». Студенты, аспиранты, молодые ученые и специалисты встретились на «Школе» для обсуждения и обмена опытом в области решения современных экологических проблем. Участниками «Школы» выступили представители различных научно-исследовательских организаций и вузов нашей страны и ближнего зарубежья.

В работе Конференции приняли участие 526 ученых, исследователей и специалистов, представляющих 14 субъектов Российской Федерации, а также из стран-участников СНГ (Беларусь, Таджикистан, Казахстан, Узбекистан).

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ
УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 61

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Начальник РИО А.В. Ляхтейнен
Технический редактор М.В. Иванова

Подписано в печать 29.12.2020. Формат 70×100^{1/16}. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,675. Тираж 500 экз. Заказ № 1014.
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
