

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 73

Научно-теоретический журнал

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

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2023

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 73. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2023. 134 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 РГГМУ — *председатель совета*

Михеев В. Л., канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ — *зам. председателя совета*

Леонтьев Д. В., канд. юрид. наук, проректор по развитию РГГМУ, и.о. проректора по научной работе — *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); **Камболов 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; **Малори Жан**, PhD, профессор, почетный президент РГГМУ (Франция); **Орыщенко А. С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Поздняков Ш. Р.**, д-р геогр. наук; **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, директор Института непрерывного обучения РГГМУ; **Федоров М. П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ.

Редакционная коллегия:

Малинин В. Н., д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*

Кондратьев С. А., д-р физ.-мат. наук — *зам. главного редактора*

Гайдукова Е. В., канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*

Алексеев Г. В., д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Биденко С. И.**, д-р техн. наук, проф.; **Блиновская Я. Ю.**, д-р техн. наук, проф.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вуглинский В. С.**, д-р геогр. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Ермаков Д. М.**, д-р физ.-мат. наук; **Зиновьев А. Т.**, д-р техн. наук; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Костяной А. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Кудрявцев В. Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Курашов Е. А.**, д-р биол. 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.; **Прошутинский А. Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Репина И. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Румянцев В. А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябенко В. А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С. П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Тимофеев Ю. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Филатов Н. Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Чернышков П. П.**, д-р геогр. наук, проф.; **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Якушев Д. И.**, д-ра техн. наук, проф. СПбУ МВД РФ.

Журнал является продолжением журнала «Ученые записки РГГМУ», который был основан в 2005 г. В 2010 г. он вошел в Перечень ВАК, а в январе 2020 г. переименован в журнал «Гидрометеорология и экология».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

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

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

ISSN 2713-3001

Журнал входит в Перечень ВАК по направлению науки о Земле и окружающей среде, имеет категорию K2, индексируется в системе CrossRef и 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.rshu.ru/university/notes/archive/> сразу же после его выхода.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79. Тел.: (812) 633-01-88 (доб. 421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2023

© Авторы публикаций, 2023

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

№ 73

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2023

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 73. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2023. 134 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*

Leont'ev D. V., PhD in Juridical Sciences, Vice-Rector for Development, Acting Vice-rector for Research 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; **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; **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; **Pozdnyakov Sh. R.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Salnikov V. G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean 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; **Timofeeva A. G.**, PhD in Geography, Director of the Institute of permanent education RSHU.

Editors:

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

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

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

Alekseev G. V., Grand PhD in Geography, Professor; **Belonenko T. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Bidenko S. I.**, Grand PhD in Engineering sciences, Professor; **Chernyshkov P. P.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Ermakov D. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Filatov N. N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Ivanov V. V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kostyanov A. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V. N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kurashov E. A.**, Grand PhD in Biology, 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; **Proshutinskiy A. Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Repina I. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **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; **Timofeev Iu. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **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; **Vuglinsky V. S.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Zinoviev A. T.**, Grand PhD in Engineering Sciences; **Yakushev D. I.**, Grand PhD in Engineering, Professor; SPU MI.

The Journal is continuation of the Journal "Proceedings of RSHU", founded in 2005. In 2010 it was included in the List of the Higher Attestation Commission, and in January 2020 it was renamed into the Journal "Gidrometeorologiya i ekologiya".

The Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Certificate III № ФС77-79574 of November 11, 2020.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geocology, limnology, geoinformatics, geophysics, social sciences and humanities.

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"».

ISSN 2713-3001

The Journal included in the List of the Higher Attestation Commission in the direction of science of the Earth, has category K2 and the environment is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<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. Phone: (812) 633-01-88 (421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2023
© Authors of publications, 2023

Содержание

Климатология

- И. В. Серых, Д. М. Сонечкин.* Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо — Южного колебания в моделях СМIP6 607

Метеорология

- А. Д. Клещенко, О. В. Савицкая, О. В. Вирченко.* Оценка состояния сельскохозяйственных культур и прогноз их урожайности с использованием наземной и спутниковой информации. 632
- И. Е. Кузнецов, С. А. Дьяков, Д. В. Булгин.* Методика уточнения пространственного распределения значений метеорологической дальности видимости на основе данных радиолокационных и наземных измерений 644
- Д. А. Самуленков, М. В. Сапунов.* Исследование содержания аэрозоль лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербург. 653

Океанология

- А. Е. Куприянова, В. А. Грищенко, А. В. Килесо, К. Д. Коробченкова.* О типичном и аномальном режимах выхолаживания морских вод в прибрежной зоне Куршской косы 666
- А. А. Мальшиева, Т. В. Белоненко.* Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в районе Капской котловины 684

Геоэкология

- О. И. Катайкина, В. И. Матвеев, А. Л. Фигуркин.* Гидрологическая и гидрохимическая характеристика юго-западной части озера Ханка в зимний период 2016 г.—2023 г. 699
- А. Г. Rogozin.* Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа. 711

Хроника

- И. А. Кольцов, М. А. Дмитриева, Я. В. Бубнова.* К 80-летию Михая Гавриловича Лазара 725
- Семинар-совещание с редакторами научных журналов по разработке международного индекса научного цитирования 729

Contents

Climatology

- I. V. Serykh, D. M. Sonechkin.* ENSO global teleconnections structure in CMIP6 models. 607

Meteorology

- A. D. Kleshchenko, O. V. Savitskaya, O. V. Virchenko.* Assessment of the state of agricultural crops and forecast their yields using ground and satellite information 632
- I. E. Kuznetsov, S. A. Dyakov, D. V. Bulgin.* Methodology for clarifying the spatial distribution of meteorological visibility range values based on radar and ground measurements 644
- D. A. Samulenkov, M. V. Sapunov.* Results of lidar monitoring in the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg 653

Oceanology

- A. E. Kupriyanova, V. A. Gritsenko, A. V. Kileso, K. D. Korobchenkova.* About typical and anomalous modes of sea water cooling in a coastal zone of the Curonian spit 667
- A. A. Malysheva, T. V. Belonenko.* Variability of potential and kinetic energy of mesoscale eddies in the Cape Basin 684

Geoecology

- O. I. Kataykina, V. I. Matveev, A. L. Figurkin.* Hydrological and chemical characteristics of the south-western part of Lake Khanka in winter, 2016-2023 699
- A. G. Rogozin.* Trophic Classification of the South Ural water bodies by multivariate statistics 711

- Chronicle** 725

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 607—631.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):607—631.

КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.583:001.891.573]:551.465.7
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-607-631

Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо — Южного колебания в моделях CMIP6

Илья Викторович Серых, Дмитрий Михайлович Сонечкин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, iserykh@ocean.ru

Аннотация. По результатам эксперимента piControl моделей CMIP6 исследована глобальная межгодовая изменчивость среднемесячных аномалий температуры воздуха у поверхности и атмосферного давления на уровне моря. Установлено, что некоторые модели CMIP6 достаточно близко воспроизводят свойственную для Эль-Ниньо — Южного колебания планетарную структуру амплитуды осцилляций аномалий температуры и давления. Показано, что часть рассмотренных моделей демонстрирует дальние связи Эль-Ниньо — Южного колебания со всем тропическим поясом Земли, а также с умеренными и высокими широтами.

Ключевые слова: Эль-Ниньо — Южное колебание, модели CMIP6, температура воздуха, атмосферное давление, планетарная структура, дальние связи.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2021-0003 «Крупномасштабные, волновые и вихревые океанские процессы и роль океана в формировании климата: междекадная эволюция циркуляции, гидрофизических полей океана и потоков на границе океан-атмосфера в условиях меняющегося климата».

Для цитирования: Серых И.В., Сонечкин Д. М. Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо — Южного колебания в моделях CMIP6 // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 607—631. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-607-631.

CLIMATOLOGY

Original article

ENSO global teleconnections structure in CMIP6 models

Ilya V. Serykh, Dmitry M. Sonechkin

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
iserykh@ocean.ru

Summary. The results of the piControl experiment of atmospheric and ocean general circulation models participating in the sixth stage of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) are studied.

© Серых И. В., Сонечкин Д. М., 2023

The 50 CMIP6 models considered have significant differences among themselves in the following main characteristics of the ENSO: the standard deviation of the ENSO index, its minimum and maximum values, the average period between events, and the average duration of El Niño and La Niña events. Some CMIP6 models reproduce the main characteristics of the ENSO and the asymmetry between the El Niño and La Niña events with noticeable differences from those observed in instrumental measurements. The global interannual variability of monthly anomalies of air temperature near the surface and atmospheric sea level pressure is considered. The amplitudes of fluctuations of the anomalies of these meteorological fields between opposite phases of the Global Atmospheric Oscillation (GAO), whose regional element in the Pacific tropics is the El Niño — Southern Oscillation (ENSO), are calculated. It is shown that a significant part of the considered 50 CMIP6 models demonstrate ENSO-related fluctuations in the studied fields not only in the equatorial region of the Pacific Ocean, but also in the entire tropical belt of the Earth, as well as in middle and high latitudes. At the same time, many of CMIP6 models quite closely reproduce the planetary spatial structure of the amplitude of fluctuations of temperature and pressure anomalies characteristic of GAO. However, the estimates of the energy spectra of the ENSO and GAO indices obtained from the models differ from the spectra obtained earlier from observational data, where peaks are observed at the periods of super- and sub-harmonics of external forces affecting the climate system. Thus, some of the CMIP6 models describe teleconnections between the ENSO and the tropics outside the Pacific Ocean, as well as with middle and high latitudes. Nevertheless, the CMIP6 models in the piControl experiment do not reproduce the temporal dynamics of the ENSO and GAO accurately enough, since in it, except for the annual variation of heat input from the Sun, there is no influence of other external forces on the global climate system.

Keywords: El Niño — Southern Oscillation, CMIP6 models, air temperature, atmospheric pressure, planetary structure, teleconnections.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology RAS on topic No. FMWE-2021-0003 “Large-scale, wave and eddy ocean processes and the role of the ocean in climate formation: interdecadal evolution of circulation, hydrophysical fields of the ocean and flows at the ocean-atmosphere boundary in a changing climate.”

For citation: Serykh I. V., Sonechkin D. M. ENSO global teleconnections structure in CMIP6 models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):607—631. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-607-631.

Введение

Явление Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) в Тихом океане влияет на атмосферную и океаническую циркуляцию, морские и наземные экосистемы в глобальном масштабе [1]. Масштаб и величина гидрометеорологических аномалий, связанных с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, делает ЭНЮК главным фактором глобальной межгодовой климатической изменчивости [2]. ЭНЮК оказывает воздействие на весьма удаленные от тропиков Тихого океана регионы посредством нестационарных атмосферных дальних связей [3], поэтому важное значение имеет вопрос изменения этих дальних связей в прошлом и в будущем.

В работе [4] сравниваются дальние связи ЭНЮК с приповерхностной температурой и осадками в историческом эксперименте (Historical) и экспериментах на будущее с различными сценариями выбросов парниковых газов (Shared Socioeconomic Pathways — SSP) моделей шестого этапа Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 6 — CMIP6) [5]. Обнаружены значительные будущие изменения дальних связей ЭНЮК (2081 г.—2100 г.) и осадков по сравнению с 1950 г. по 2014 г. В дополнение к этому во многих регионах эти изменения в дальних связях ЭНЮК масштабируются с прогнозируемым уровнем потепления, при этом более сильное потепление приводит к более значительным изменениям в дальних связях.

В экспериментах SSP изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) в большинстве моделей CMIP6 усиливается в разной степени [6]. Это увеличение связано с ослаблением температурного градиента с востока на запад в тропической части Тихого океана, что демонстрирует большинство моделей. При этом многие характеристики будущего ЭНЮК остаются неопределенными. Это включает в себя изменения в преобладающих периодах флуктуаций ЭНЮК (2—7 лет), во внетропических дальних связях и амплитуде явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При этом их важной особенностью является то, что для моделей с самым сильным увеличением будущей изменчивости ТПО большая часть увеличения происходит в восточной части Тихого океана, где обычно происходят самые сильные явления Эль-Ниньо.

Прогнозы амплитуды ЭНЮК в моделях CMIP5 (предыдущий этап Проекта сравнения моделей) и CMIP6 демонстрируют большой разброс в изменениях стандартного отклонения к концу XXI века [7]. При этом среднее по ансамблю изменение амплитуды ЭНЮК близко к нулю. Внутренняя изменчивость является основным фактором неопределенности в течение первых трех десятилетий, после этого преобладает модельный разброс, в то же время разница между сценариями относительно невелика на протяжении всего XXI века. При этом, несмотря на большую межмодельную изменчивость в связанных с ЭНЮК аномалиях ТПО, результаты моделирования зафиксировали устойчивую интенсификацию и смещение на восток вызванных ЭНЮК осадков в условиях глобального потепления [8].

Существуют устойчивые междесятилетние вариации интенсивности и местоположения основных аномалий при событиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья, которые связаны с возмущениями ветра и глубины термоклина на экваторе, а также с внетропическими аномалиями в северной и южной частях Тихого океана [9]. Некоторые климатические модели CMIP5 и CMIP6 способны моделировать такую междесятилетнюю изменчивость разнообразия ЭНЮК и связанные с ней крупномасштабные закономерности. Прогнозы разнообразия ЭНЮК в будущих сценариях изменения климата сильно зависят от величины этих междесятилетних вариаций и способности климатических моделей реалистично воспроизводить их в XXI веке.

Важным аспектом ЭНЮК является асимметрия между двумя его противоположными фазами: Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Результаты оценки воспроизведения этого свойства ЭНЮК моделями CMIP6 показывают, что модели по-прежнему недооценивают данную асимметрию [10]. Требуется модифицировать моделирование обратной связи между атмосферой и потоками тепла из океана. Данное обстоятельство может существенным образом повлиять на дальние связи событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в моделях CMIP6. Также важной особенностью ЭНЮК является наличие двух типов событий: восточно-тихоокеанского (ВТ) и центрально-тихоокеанского (ЦТ). В моделях CMIP6 амплитуда и пространственная структура ЦТ ЭНЮК воспроизводятся качественнее по сравнению с CMIP5 [11]. Однако существенного улучшения периодичности и фазовой синхронизации ЭНЮК по сравнению с CMIP5 не произошло.

В исследовании [12] оценивается сезонная фазовая синхронизация ЭНЮК в 42 моделях СМIP6, 43 моделях СМIP5 и данных наблюдений. Лишь несколько моделей (12 в СМIP5 и 15 в СМIP6) воспроизводят ЭНЮК с большей долей зимних пиковых явлений, что указывает на то, что сезонная синхронизация фаз ЭНЮК по-прежнему является проблемой для современных климатических моделей. Таким образом, в большинстве моделей СМIP5 и СМIP6 не удастся воспроизвести фазовую синхронизацию ЭНЮК, поскольку вклад зональной адвективной обратной связи в сезонную модуляцию скорости роста ТПО намного меньше по сравнению с наблюдениями [13, 14]. Также не было выявлено последовательной связи между изменениями годового цикла и амплитуды ЭНЮК в палеоклиматических экспериментах с моделями СМIP5/6 [15].

ЭНЮК взаимодействует с Индоокеанским диполем (ИОД), что делает необходимым одновременное моделирование ЭНЮК и ИОД. При использовании 32 моделей СМIP5 и 34 моделей СМIP6 в [16] обнаружено, что имеются изменения в основных характеристиках ЭНЮК и ИОД в СМIP6 по сравнению с СМIP5. Во-первых, наблюдается небольшое смещение сезонности ИОД в сторону более раннего пика в сентябре в СМIP6 по сравнению с ноябрем в СМIP5. Во-вторых, межмодельный разброс частоты ЭНЮК и ИОД уменьшился в СМIP6 по сравнению с СМIP5. Большинство моделей СМIP6 могут воспроизводить ведущую моду дипольных колебаний аномалий теплосодержания между востоком и западом тропической части Индийского океана, но в значительной степени переоценивают амплитуду и доминирующий период подповерхностного ИОД [17].

Циркуляция Уокера является одним из основных компонентов глобальной климатической системы. Она связывает изменчивость температуры поверхности Тихого океана с изменчивостью климата в акваториях других океанов вплоть до средних и высоких широт. Однако атмосферная обратная связь, связанная с ЭНЮК, в частности, реакция приповерхностного ветра, в значительной степени недооценивается в моделях СМIP5/6 [18]. Также выявлены различия в характеристиках давления на уровне моря (ДУМ) и циркуляции Уокера между различными моделями. В то время как отклики ДУМ на изменчивость ТПО, связанную с Эль-Ниньо, хорошо воспроизводятся в большинстве моделей; отклики функции тока циркуляции Уокера в большинстве этих моделей в значительной степени недооцениваются.

Существуют предикторы ЭНЮК, связанные с Северо-Тихоокеанским колебанием (North Pacific Oscillation — NPO): зарядка пассатами («trade wind charging» — TWC) подповерхностного теплосодержания на экваторе Тихого океана и меридиональная мода северной части Тихого океана (Northern Pacific meridional mode — NPMM) [19]. В работе [20] проведена оценка воспроизведения режима TWC/NPMM и его взаимосвязи с ЭНЮК в моделях высокого разрешения СМIP6. Обнаружено, что TWC/NPMM, несмотря на некоторые пространственные вариации, является последовательным предшественником ЭНЮК по всему ансамблю моделей. Кроме того, предыдущие анализы данных, основанных на наблюдениях, показывают, что взаимосвязь TWC/NPMM с ЭНЮК является надежной, хотя и не стационарной, и ее вариации могут влиять на характерную изменчивость

самой ЭНЮК. При этом взаимосвязь между ЭНЮК и зимней синоптической изменчивостью температуры над Азиатско-Тихоокеанско-Американским регионом в большинстве моделей СМIP5/6 воспроизводится с существенными отличиями от данных наблюдений [21].

Модели СМIP6 могут хорошо воспроизводить сигналы ЭНЮК в арктической стратосфере и имеют улучшенные характеристики по сравнению с моделями СМIP5 [22]. В частности, события Эль-Ниньо связаны с усиленным тихоокеанско-североамериканским паттерном (Pacific–North American — PNA), который приводит к теплоте и ослабленному стратосферному полярному вихрю. Случай с Ла-Нинья почти противоположный, он связан с холодным и усиленным стратосферным полярным вихрем. По сравнению с ЭНЮК-нейтральными зимами внезапное потепление в стратосфере происходит чаще (реже) во время Эль-Ниньо (Ла-Нинья), что воспроизводится некоторыми моделями СМIP6. Также отклик стратосферы Арктики на явления Эль-Ниньо зависит от их типа: восточно- и центрально-тихоокеанского [23].

В работах [24—28] предпринята попытка объединить прямые и обратные дальние связи между ЭНЮК и климатическими процессами по всей Земле в одно планетарное явление, которое названо Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО). Анализ глобальных вариаций гидрометеорологических параметров между противоположными фазами ГАО в моделях общей циркуляции атмосферы и океана, участвующих в пятом этапе Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 5 — СМIP5), показал воспроизведение планетарной пространственной структуры ГАО некоторыми из рассмотренных климатических моделей [29].

В [30] обнаружено, что модели СМIP6 значительно превосходят модели СМIP5 по 8 из 24 показателей, относящихся к ЭНЮК, при этом большинство моделей СМIP6 демонстрируют улучшенную сезонность тропической части Тихого океана и дальние связи ЭНЮК. В [31] выявлены значительные улучшения в представлении ЭНЮК моделями СМIP6 по сравнению с СМIP5. Погрешности амплитуды и пространственной структуры аномалий уменьшились при переходе от поколения к поколению моделей. Например, уменьшились смещения связанных с ЭНЮК аномалий ТПО в экваториальной части Тихого океана, которые в моделях простираются слишком далеко на запад. При этом изменения спектров ЭНЮК малы по сравнению с внутренней изменчивостью, что не позволяет делать однозначные заявления об улучшении.

Таким образом, целью данной работы является исследование воспроизведения моделями СМIP6 внутритропических дальних связей ЭНЮК и планетарной пространственной структуры ГАО.

Методика исследования

Исследованы глобальные данные температуры воздуха у поверхности (ТВП) и атмосферного давления на уровне моря, полученные в результате преиндустриального контрольного эксперимента (preindustrial control — piControl)

климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, входящих в шестой этап Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 6 — CMIP6) [5]. В эксперименте piControl отсутствует внешний форсинг от изменений концентрации парниковых газов в атмосфере и вариаций солнечного излучения. Из внешних сил, воздействующих на климатическую систему, в эксперименте piControl присутствует только годовой ход поступления тепла от Солнца. При этом выполненные в рамках эксперимента piControl совместные расчеты общей циркуляции атмосферы и океана покрывают продолжительные временные периоды, меняющиеся для разных моделей в диапазоне 250—1200 лет. Названия и основные характеристики анализируемых 52 моделей представлены в табл. 1 (столбцы 1—3). Модели GISS-E2-2-H и KACE-1-0-G исключены из дальнейшего рассмотрения по причине обнаружения в них сильного изменения (так называемого «дрейфа») ТВП в центрально-восточной части экваториальной области Тихого океана, более подробно описанного ниже. Таким образом, весь последующий анализ и усреднения производятся по результатам эксперимента piControl 50 моделей CMIP6, перечисленных в табл. 1.

Чтобы определить события Эль-Ниньо и Ла-Нинья в данной работе используется индекс, который называется Расширенный океанический индекс Ниньо (Extended Oceanic Niño Index — EONI) [32]. EONI представляет собой средние значения аномалий ТВП в экваториальном регионе Тихого океана (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170° — 80° з.д.). Этот регион шире, чем регион Niño3.4 (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170° — 120° з.д.), в котором аномалии ТПО используются для построения стандартного для изучения явления ЭНЮК индекса ONI. Усреднение аномалий ТВП по более обширному региону в EONI обуславливается различиями между моделями в пространственном расположении наибольших аномалий ТПО при событиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В разных моделях характерная пространственная структура — так называемый «язык» положительных (отрицательных) аномалий ТПО при Эль-Ниньо (Ла-Нинья) — может доходить вдоль экватора от побережья Южной Америки, как до центра Тихого океана, так до побережья Индонезии. Также не все модели в должной мере воспроизводят события ЭНЮК центрально-тихоокеанского типа [33]. Вот почему в расчет индекса EONI, по которому в настоящей работе определяются события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, включен как центральный, так и восточный экваториальный районы Тихого океана. Таким образом, EONI характеризует как восточно-тихоокеанские, так и центрально-тихоокеанские события ЭНЮК.

В каждом узле сетки отдельно взятой модели вычислены аномалии ТВП и ДУМ относительного среднего годового хода за весь период результатов эксперимента piControl этой модели. Затем аномалии ТВП усреднялись в регионе (5° с.ш.— 5° ю.ш., 170° — 80° з.д.), и полученный временной ряд сглаживался трехмесячным скользящим средним для получения своего собственного для каждой модели временного ряда EONI. Затем по полученным EONI отдельно для каждой модели определялись события Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При Эль-Ниньо (Ла-Нинья) значения EONI должны непрерывно превышать $+0,5^{\circ}\text{C}$ (быть менее $-0,5^{\circ}\text{C}$) на протяжении 5 месяцев и более. Использование данных ТВП, а не ТПО

обусловлено тем, что они очень близки друг к другу, но данные ТВП покрывают и сушу, что позволяет оценивать более полную картину при анализе температурных полей.

В таблице 1 (столбец 4) приведены изменения EONI, оцененные линейными приближениями с помощью метода наименьших квадратов. Модели GISS-E2-2-H и KACE-1-0-G демонстрируют существенное изменение («дрейф») EONI, поэтому они были исключены из дальнейшего анализа. Таким образом, далее будут рассмотрены 50 моделей CMIP6, имеющих незначительный линейный тренд изменений ТВП в регионе (5° с.ш.—5° ю.ш., 170°—80° з.д.).

Таблица 1

Основные характеристики ЭНЮК исследуемых моделей CMIP6
Main ENSO characteristics of the studied CMIP6 models

Название модели	Разрешение (°ш. × °д.)	Число лет в эксперименте	Изменение EONI (°С за 100 лет)	Стандартное отклон. EONI (°С)	Мин. значение EONI (°С)	Макс. значение EONI (°С)	Сред. период ЭНЮК (годы)	Продолжительность Эль-Ниньо (месяцы)	Продолжительность Ла-Нинья (месяцы)
NASA GISS-E2-2-H	2,000 × 2,500	251	-0,13	Модель исключена из дальнейшего рассмотрения					
NIMS KACE-1-0-G	1,250 × 1,875	450	0,25	Модель исключена из дальнейшего рассмотрения					
AS-RCEC TaiESM1	0,938 × 1,250	500	0,00	0,87	-2,91	3,73	4,02	11,7	11,2
AWI-CM-1-1-MR	0,938 × 0,938	500	0,00	0,87	-3,36	4,40	3,62	9,8	10,2
BCC-CSM2-MR	1,125 × 1,125	600	0,03	1,03	-3,64	3,17	2,84	9,9	10,0
BCC-ESM1	2,812 × 2,812	451	0,01	0,65	-2,56	2,00	3,76	7,8	7,7
CAMS-CSM1-0	1,125 × 1,125	500	0,02	1,18	-4,37	3,02	2,82	10,4	10,9
CAS-ESM2-0	1,406 × 1,406	550	0,02	1,03	-3,35	3,40	3,47	11,5	11,7
CAS FGOALS-f3-L	1,000 × 1,250	561	0,01	1,06	-3,01	2,70	3,28	12,8	13,4
CAS FGOALS-g3	2,250 × 2,000	700	-0,02	0,88	-3,12	2,34	3,24	10,5	9,9
CanESM5	2,812 × 2,812	1000	-0,01	0,58	-1,97	2,26	5,06	10,5	9,9
CanESM5-CanOE	2,812 × 2,812	501	-0,01	0,62	-2,15	2,15	4,55	10,4	10,5
CMCC-CM2-SR5	0,938 × 1,250	500	0,06	0,89	-2,56	4,21	4,93	14,6	14,2
CMCC-ESM2	0,938 × 1,250	500	0,02	1,18	-3,27	4,20	4,61	17,6	17,2
CNRM-CM6-1	1,406 × 1,406	500	0,03	0,70	-2,28	2,04	4,20	10,3	10,3
CNRM-CM6-1-HR	0,500 × 0,500	300	0,06	0,48	-1,66	1,56	7,32	9,3	9,5
CNRM-ESM2-1	1,406 × 1,406	500	-0,02	0,74	-3,01	2,24	3,69	9,5	9,2
CSIRO ACCESS-CM2	1,250 × 1,875	500	0,04	0,83	-3,34	2,30	3,24	10,0	9,0
ACCESS-ESM1-5	1,241 × 1,875	900	0,00	0,78	-3,03	2,41	3,71	11,0	10,9
E3SM-1-0	1,000 × 1,000	500	0,00	0,78	-3,37	2,63	3,76	9,6	9,6
EC-Earth3	0,703 × 0,703	501	-0,01	0,54	-1,97	2,37	5,76	9,8	8,9
EC-Earth3-AerChem	0,703 × 0,703	311	-0,03	0,48	-1,69	1,67	7,32	9,0	8,0

Название модели	Разрешение (°ш. × °д.)	Число лет в эксперименте	Изменение EONI (°С за 100 лет)	Стандартное отклон. EONI (°С)	Мин. значение EONI (°С)	Макс. значение EONI (°С)	Сред. период ЭНЮК (годы)	Продолжительность Эль-Ниньо (месяцы)	Продолжительность Ла-Нинья (месяцы)
EC-Earth3-Veg	0,703 × 0,703	500	0,01	0,58	-2,52	1,75	4,78	9,2	9,0
EC-Earth3-Veg-LR	1,125 × 1,125	501	0,02	0,50	-2,00	1,68	5,86	8,7	8,1
FIO-ESM-2-0	0,938 × 1,250	575	0,00	0,67	-2,33	3,20	4,73	10,9	10,2
MPI-ESM-1-2-HAM	1,875 × 1,875	1000	0,00	0,71	-2,52	2,91	4,76	11,7	10,2
INM-CM4-8	1,500 × 2,000	531	-0,04	0,40	-1,54	1,36	13,11	8,2	7,6
INM-CM5-0	1,500 × 2,000	1201	-0,01	0,41	-1,73	1,63	10,72	8,0	7,4
IPSL-CM6A-LR	1,259 × 2,500	800	0,00	0,84	-2,75	2,79	3,70	12,0	11,9
KIOST-ESM	1,875 × 1,875	500	-0,07	1,09	-3,14	2,84	3,29	12,6	13,0
MIROC-ES2L	2,812 × 2,812	500	0,00	0,89	-2,56	2,87	5,00	15,7	15,8
MIROC6	1,406 × 1,406	800	0,01	0,77	-2,31	3,38	5,30	14,8	12,7
HadGEM3-GC31-LL	1,250 × 1,875	500	0,04	0,79	-2,94	3,36	4,00	11,4	10,6
HadGEM3-GC31-MM	0,556 × 0,833	500	0,07	0,76	-2,75	2,42	4,29	12,1	11,4
MPI-ESM1-2-HR	0,938 × 0,938	500	0,00	0,66	-2,25	2,35	5,78	14,7	11,0
MPI-ESM1-2-LR	1,875 × 1,875	1000	0,00	0,73	-2,69	3,89	4,71	12,8	11,5
MRI-ESM2-0	1,125 × 1,125	701	0,02	0,79	-2,65	2,61	3,91	11,0	10,9
NASA GISS-E2-1-G	2,000 × 2,500	851	0,00	1,07	-3,85	2,64	4,22	17,5	17,1
NASA GISS-E2-1-H	2,000 × 2,500	401	0,00	0,71	-2,24	2,67	4,92	13,6	11,6
NCAR CESM2	0,938 × 1,250	1200	0,02	0,92	-2,99	3,50	3,87	12,2	12,5
NCAR CESM2-FV2	1,875 × 2,500	500	0,00	1,07	-3,23	3,35	3,32	12,0	12,0
CESM2-WACCM	0,938 × 1,250	499	0,03	0,84	-3,09	3,53	3,93	11,8	11,2
CESM2-WACCM-FV2	1,875 × 2,500	500	0,03	1,14	-3,61	3,41	3,40	12,8	13,3
NCC NorCPM1	1,875 × 2,500	500	0,02	0,79	-2,84	2,61	3,79	11,0	11,2
NCC NorESM2-LM	1,875 × 2,500	501	0,02	1,07	-3,38	3,55	3,87	13,9	13,3
NCC NorESM2-MM	0,938 × 1,250	500	-0,01	1,10	-3,29	4,00	3,94	14,5	14,6
NOAA GFDL-CM4	1,000 × 1,250	500	0,04	0,72	-2,57	2,71	4,07	9,8	9,8
NOAA GFDL-ESM4	1,000 × 1,250	500	0,02	0,81	-3,03	3,57	4,10	11,0	12,3
NUIST NESM3	1,875 × 1,875	500	0,02	0,63	-2,32	2,08	5,15	10,1	9,5
SAM0-UNICON	0,938 × 1,250	700	-0,02	0,84	-3,27	3,72	3,78	10,8	9,9
THU CIESM	0,938 × 1,250	500	0,04	0,68	-2,26	2,44	4,52	11,0	11,7
UA MCM-UA-1-0	2,250 × 3,750	500	0,00	0,52	-1,69	2,26	8,06	12,4	10,4
Минимум				0,40	-4,37	1,36	2,82	7,8	7,4
Максимум				1,18	-1,54	4,40	13,11	17,6	17,2
Среднее				0,79	-2,74	2,80	4,68	11,5	11,1

Для нахождения положительных и отрицательных фаз ГАО использован индекс GAO1, который рассчитывается как сумма нормированных значений

аномалий ДУМ в десяти районах, совпадающих с максимумами и минимумами в пространственной структуре аномалий ДУМ поля ГАО [34]. GAO1 рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{GAO1} = & P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 145^\circ - 155^\circ \text{ в.д.}) + P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 55^\circ - 65^\circ \text{ в.д.}) + \\ & + P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 35^\circ - 25^\circ \text{ з.д.}) + P(55^\circ - 65^\circ \text{ с.ш.}, 95^\circ - 85^\circ \text{ з.д.}) + \\ & + P(65^\circ - 55^\circ \text{ ю.ш.}, 95^\circ - 85^\circ \text{ з.д.}) - P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 95^\circ - 85^\circ \text{ з.д.}) - \\ & - P(45^\circ - 55^\circ \text{ с.ш.}, 175^\circ - 165^\circ \text{ з.д.}) - P(45^\circ - 55^\circ \text{ с.ш.}, 15^\circ - 5^\circ \text{ з.д.}) - \\ & - P(55^\circ - 45^\circ \text{ ю.ш.}, 15^\circ - 5^\circ \text{ з.д.}) - P(55^\circ - 45^\circ \text{ ю.ш.}, 175^\circ - 165^\circ \text{ з.д.}), \end{aligned}$$

где P — средние аномалии ДУМ в районах с заданными координатами.

Индекс GAO1 сглаживается трехмесячным скользящим средним, центрируется и нормируется на своё среднеквадратическое отклонение. Таким образом, среднее значение итогового временного ряда GAO1 равно 0, а его среднеквадратическое отклонение равняется 1. Если значения индекса GAO1 были больше (меньше) +0,5 (−0,5) на протяжении 5 месяцев и более, то этот промежуток времени относится к положительной (отрицательной) фазе ГАО.

Чтобы охарактеризовать дальние связи явления ЭНЮК с другими регионами, входящими в планетарную структуру ГАО, из GAO1 исключаются компоненты (5° ю.ш.— 5° с.ш., 145° — 155° в.д.) и (5° ю.ш.— 5° с.ш., 95° — 85° з.д.). Поскольку аномалии ДУМ в этих районах используются при расчете экваториального индекса Южного колебания (ЮК) (Equatorial Southern Oscillation Index), то таким образом ГАО отделяется от ЮК [32]. Индекс ГАО без ЮК рассчитывается по нормированным аномалиям ДУМ в 8 районах по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{GAO2} = & \text{GAO1} - [P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 145^\circ - 155^\circ \text{ в.д.}) - \\ & - P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 95^\circ - 85^\circ \text{ з.д.})], \end{aligned}$$

где P — средние аномалии ДУМ в районах с заданными координатами.

Затем, чтобы охарактеризовать дальние связи ЭНЮК с внетропическими широтами, из индекса GAO2 исключаются районы в тропиках Индийского (5° ю.ш.— 5° с.ш., 55° — 65° в.д.) и Атлантического (5° ю.ш.— 5° с.ш., 35° — 25° з.д.) океанов. Получившийся индекс ГАО называется внетропическим индексом ГАО (Extratropical GAO – EGAO) [32]:

$$\begin{aligned} \text{EGAO} = & \text{GAO2} - [P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 55^\circ - 65^\circ \text{ в.д.}) + \\ & + P(5^\circ \text{ ю.ш.} - 5^\circ \text{ с.ш.}, 35^\circ - 25^\circ \text{ з.д.})], \end{aligned}$$

где P – средние аномалии ДУМ в районах с заданными координатами.

По всем описанным выше индексам EONI, GAO1, GAO2 и EGAO для каждой из рассматриваемых 50 моделей CMIP6 строились средние поля амплитуды колебаний аномалий ТВП и ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК и ГАО. По ним вычислялись среднемодельные поля и с помощью среднеквадратических отклонений оценивалась их межмодельная изменчивость.

Методом быстрого преобразования Фурье с максимальным разрешением оценены энергетические спектры описанных выше индексов ЭНЮК и ГАО. Каждая запись наблюдений любой гидрологической величины, даже если эта величина непрерывно изменяется, имеет конечную длину и конечное временное разрешение. Такая запись не может быть представлена интегралом Фурье $S(f)$, где f является

непрерывно изменяющейся частотой, а только конечным рядом коэффициентов Фурье $S(f_n)$ (где f_n из дискретной последовательности частот), соответствующих гармоникам, которые кратны общей длине записи. В результате действительная амплитуда гармоник Фурье, которая не кратна общей длине записи, может быть недооценена, если эта амплитуда незначительно отличается от амплитуд ближайших гармоник. Чтобы избежать этого, можно использовать многократное вычисление периодограмм для записей, которые остаются после последовательного сокращения начальной записи. Затем все такие периодограммы совмещаются, и в случае совпадения периодов усредняются. Это увеличивает спектральное разрешение и, таким образом, позволяет точнее находить пики спектральной плотности на периодах, не кратных общей длине исходной записи. По-видимому, впервые этот прием был применен в [35].

При использовании такого подхода спектры мощности оцениваются не только для общей длины записи, но также и для постепенно сокращенных временных рядов с последующим совмещением всех полученных периодограмм. Спектры с максимальным разрешением индексов ЭНЮК и ГАО строятся путем последовательного сокращения длин их временных рядов до половины от их первоначальной длины, поскольку при этом получают наиболее непрерывные оценки спектральной плотности для всех частот. Спектры оцениваются сначала для ряда длиной N : (1, ..., N); затем для двух рядов длины $N-1$: (1, ..., $N-1$) и (2, ..., N); затем для трех рядов длины $N-2$: (1, ..., $N-2$), (2, ..., $N-1$) и (3, ..., N) и т.д., до $N/2$ рядов длины $N/2$: (1, ..., $N/2$), (2, ..., $N/2+1$), ..., ($N/2$, ..., N). Затем все полученные спектры индекса объединяются в один путем упорядочивания по частотам и усреднения при совпадении частот. При этом спектральная оценка индексов производится на годовом периоде [26, 32]. Для этого вычисляются спектры с максимальным разрешением индексов для каждого месяца года по отдельности. Затем полученные для каждого индекса 12 спектров усредняются. Данная методика спектральной оценки на периоде внешней силы позволяет уменьшить влияние этой периодичности на получающиеся спектры.

Результаты исследования

Среднее по 50 моделям СМIP6 среднеквадратическое отклонение EONI составляет $0,79$ °C (таблица 1, столбец 5). Выбранный для определения событий ЭНЮК по EONI критерий $0,5$ °C является меньше среднеквадратического отклонения этого индекса у большинства моделей СМIP6. Среднее минимальное значение EONI составляет $-2,74$ °C (таблица 1, столбец 6). Среднее максимальное значение EONI составляет $+2,80$ °C (таблица 1, столбец 7).

ЭНЮК присуща асимметрия, одной из особенностей которой является то, что абсолютные значения аномалий ТПО в экваториальной области Тихого океана при сильнейших событиях Эль-Ниньо выше, чем при сильнейших Ла-Нинья [36]. Данная асимметрия ЭНЮК наблюдается далеко не во всех рассмотренных 50 моделях СМIP6. Так, в некоторых моделях СМIP6 минимальные значения EONI оказались по модулю больше максимальных значений EONI (таблица 1).

Средний период ЭНЮК по 50 моделям СМIP6 составляет 4,68 г. (таблица 1, столбец 8). Он вычисляется для каждой модели как удвоенное число лет эксперимента, деленное на общее количество событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Средняя продолжительность событий Эль-Ниньо по 50 моделям СМIP6 составляет 11,5 месяца (таблица 1, столбец 9). Средняя продолжительность событий Ла-Нинья по 50 моделям СМIP6 составляет 11,1 мес. (таблица 1, столбец 10).

Некоторые модели СМIP6 демонстрируют более длительную среднюю продолжительность событий Эль-Ниньо, чем событий Ла-Нинья (таблица 1). Такая асимметрия продолжительности событий ЭНЮК, при которой события Эль-Ниньо длятся дольше, чем события Ла-Нинья, противоположна результатам, полученным по натурным данным. Так, за время надежных инструментальных наблюдений (1950—2022 гг.) происходили события Ла-Нинья (1954—1956 гг., 1998—2001 гг. и др.) существенно более продолжительные, чем любое из событий Эль-Ниньо, зафиксированное за этот временной период [37].

Таким образом, можно сделать вывод о наличии заметных различий в основных характеристиках ЭНЮК между моделями СМIP6 (таблица 1). Более того, по данным инструментальных измерений часть рассмотренных моделей СМIP6 воспроизводит основные характеристики ЭНЮК и асимметрию между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья с существенными отличиями от наблюдаемых. Исходя из этого, можно заключить, что далеко не все модели СМIP6 воспроизводят ЭНЮК с высокой точностью.

Перейдем к сравнению дальних связей ЭНЮК, которые воспроизводят рассматриваемые модели СМIP6. На рис. 1 представлены поля амплитуд колебаний средних аномалий ТВП между противоположными фазами ЭНЮК для 8 выбранных из 50 рассматриваемых моделей СМIP6. Следует обратить внимание, что некоторые из этих моделей достаточно хорошо воспроизводят пространственную структуру ГАО аномалий ТВП (поле ГАО ТВП), полученную ранее по данным наблюдений и реанализам [24, 25, 27, 34]. Поля ГАО ТВП построены по индексу EONI методом, описанным в разделе «Методика исследования», для всех рассматриваемых 50 моделей СМIP6. Оказалось, что существенная часть моделей СМIP6 довольно хорошо воспроизводит пространственную структуру поля ГАО ТВП, симметричную относительно экватора с учетом расположения континентов. При чем, по сравнению с моделями СМIP5 [29], число моделей в СМIP6, воспроизводящих глобальную пространственную структуру амплитуды колебаний аномалий ТВП между противоположными фазами ЭНЮК, существенно увеличилось. Таким образом, можно сделать вывод, что в моделях СМIP6 улучшилось описание дальних связей между ЭНЮК и ТВП вне тропиков Тихого океана по сравнению с моделями СМIP5.

Дополнительно построено среднее по рассматриваемым 50 моделям СМIP6 поле ГАО ТВП (рис. 2, а). Для этого полученные для каждой модели поля ГАО ТВП интерполировались на единую сетку $1^\circ \times 1^\circ$ и затем усреднялись между собой. Среднемодельное поле ГАО ТВП во многих деталях повторяет поля ГАО ТВП, полученные ранее по данным наблюдений и реанализам [24, 25, 27, 34]. На среднемодельном поле ГАО ТВП вдоль экватора центральной и восточной

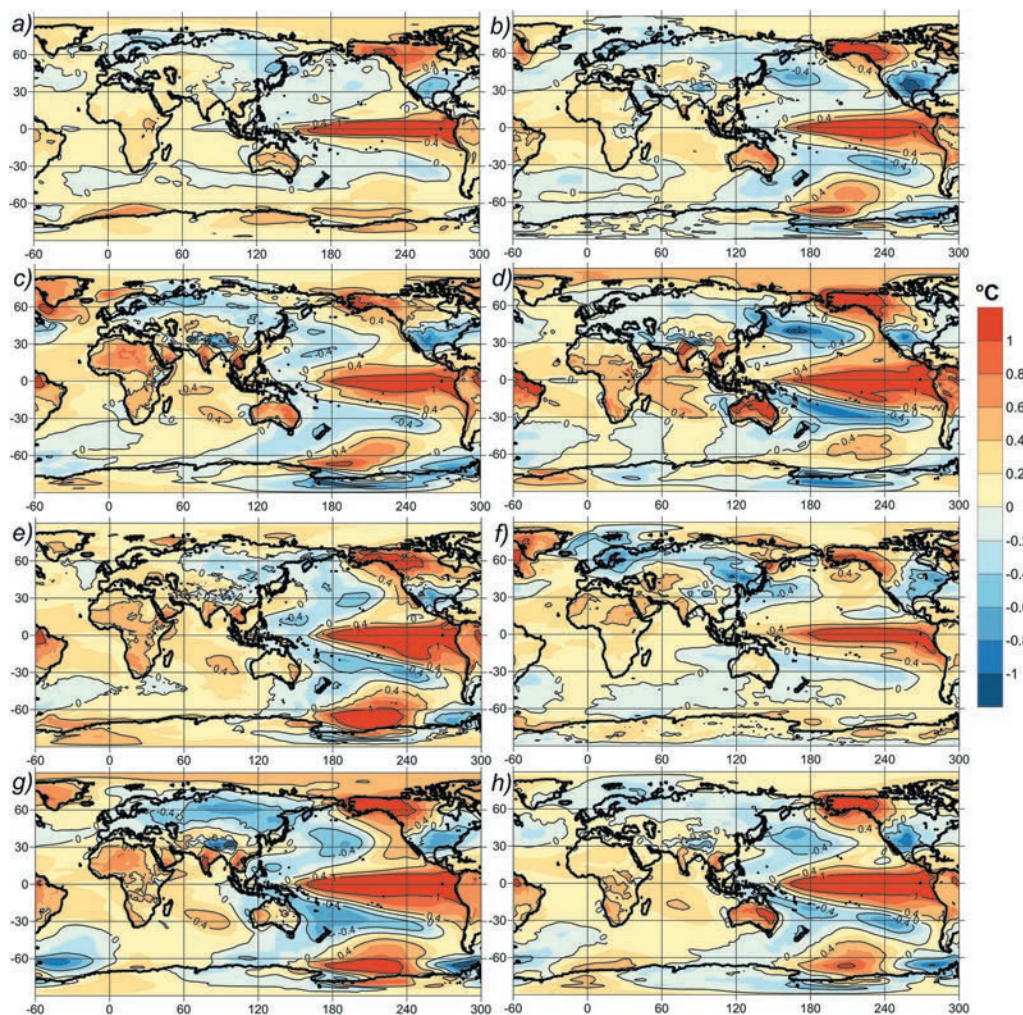


Рис. 1. Поля разности средних аномалий температуры воздуха у поверхности между противоположными фазами Эль-Ниньо–Южного колебания по индексу EONI для моделей: BCC-CSM2-MR (a), CNRM-ESM2-1 (b), EC-Earth3 (c), MIROC6 (d), HadGEM3-GC31-MM (e), INM-CM5-0 (f), NCAR CESM2 (g), NOAA GFDL-ESM4 (h).

Fig. 1. Difference fields of average surface air temperature anomalies between opposite phases of El Niño–Southern Oscillation according to EONI index for models: BCC-CSM2-MR (a), CNRM-ESM2-1 (b), EC-Earth3 (c), MIROC6 (d), HadGEM3-GC31-MM (e), INM-CM5-0 (f), NCAR CESM2 (g), NOAA GFDL-ESM4 (h).

части Тихого океана наблюдаются положительные аномалии ТВП, характерные для Эль-Ниньо — так называемый «язык» положительных аномалий ТПО, проявляющийся также и в аномалиях уровня океана [38]. Более слабые значения

положительных аномалий ТВП распространяются от экватора на север и на юг вдоль побережий Северной и Южной Америки. Достигая высоких широт, аномалии усиливаются и формируют два расположенных симметрично относительно экватора региона положительных аномалий ТВП над Аляской и морями Амундсена и Росса. Более слабые положительные аномалии ТВП распространяются далее в полярные области вплоть до Гренландии и Антарктиды, но величина их при этом мала, а межмодельная изменчивость высока (рис. 2, *b*). Также межмодельная изменчивость велика и на экваторе Тихого океана, что свидетельствует о существенных различиях в воспроизведении моделями СМIP6 характерных для ЭНЮК аномалий ТВП в этом регионе.

На среднемодельном поле ГАО ТВП отрицательные аномалии расположены на западе Тихого океана с двумя очагами в средних широтах его северной и южной частях (рис. 2, *a*). Из этих очагов отрицательные аномалии ТВП распространяются в северную Евразию и в регион южнее Австралии, но величина их при этом мала. Существенные отрицательные аномалии ТВП наблюдаются также в центральной части Северной Америки и к югу от Южной Америки. Таким образом, отрицательные аномалии ТВП частично окружают покрытый преимущественно положительными аномалиями ТВП регион тропиков Индийского и Атлантического океанов, включающий полуостров Индостан, Юго-Восточную Азию, часть Индонезийского архипелага, Австралию, Африку и Аравийский полуостров. Исключением является регион Гималаев и Тибетского плато, где, видимо, вследствие большой высоты над уровнем моря, расположены отрицательные аномалии ТВП.

Из анализа среднего поля разности аномалий температуры воздуха у поверхности между противоположными фазами Эль-Ниньо — Южного колебания по индексу EONI для 50 моделей и поля их среднеквадратических отклонений (рис. 2) следует, что большие по модулю значения аномалий ТВП наблюдаются как над океанами, так и над континентами, но при этом над сушей межмодельная изменчивость в основном выше. Исключениями являются экваториальная область Тихого океана, где развиваются события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также акватории Южного и Северного Ледовитого океанов, покрытые льдом большую часть года. Таким образом, пространственная структура ГАО ТВП является более устойчивой над океанами, чем над континентами, что свидетельствует о существенной роли взаимодействия атмосферы и океана в её формировании, и, соответственно, в формировании внетропических дальних связей ЭНЮК.

Рассмотрим глобальную структуру амплитуды колебаний аномалий ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК для выбранных ранее 8 моделей СМIP6 по отдельности (рис. 3) и среднее поле ГАО ДУМ для всех 50 рассматриваемых моделей (рис. 4). В СМIP6 число моделей, воспроизводящих особенности планетарной структуры поля ГАО ДУМ, увеличилось по сравнению с СМIP5 [29]. Глобальная пространственная структура поля ГАО ДУМ обладает симметрией относительно экватора, как и поле ГАО ТВП. Более того, поле ГАО ДУМ обладает симметрией еще и относительно 90° з.д. при учете конфигурации расположения континентов. Следует отметить, что полученное в [39] поле удаленного отклика

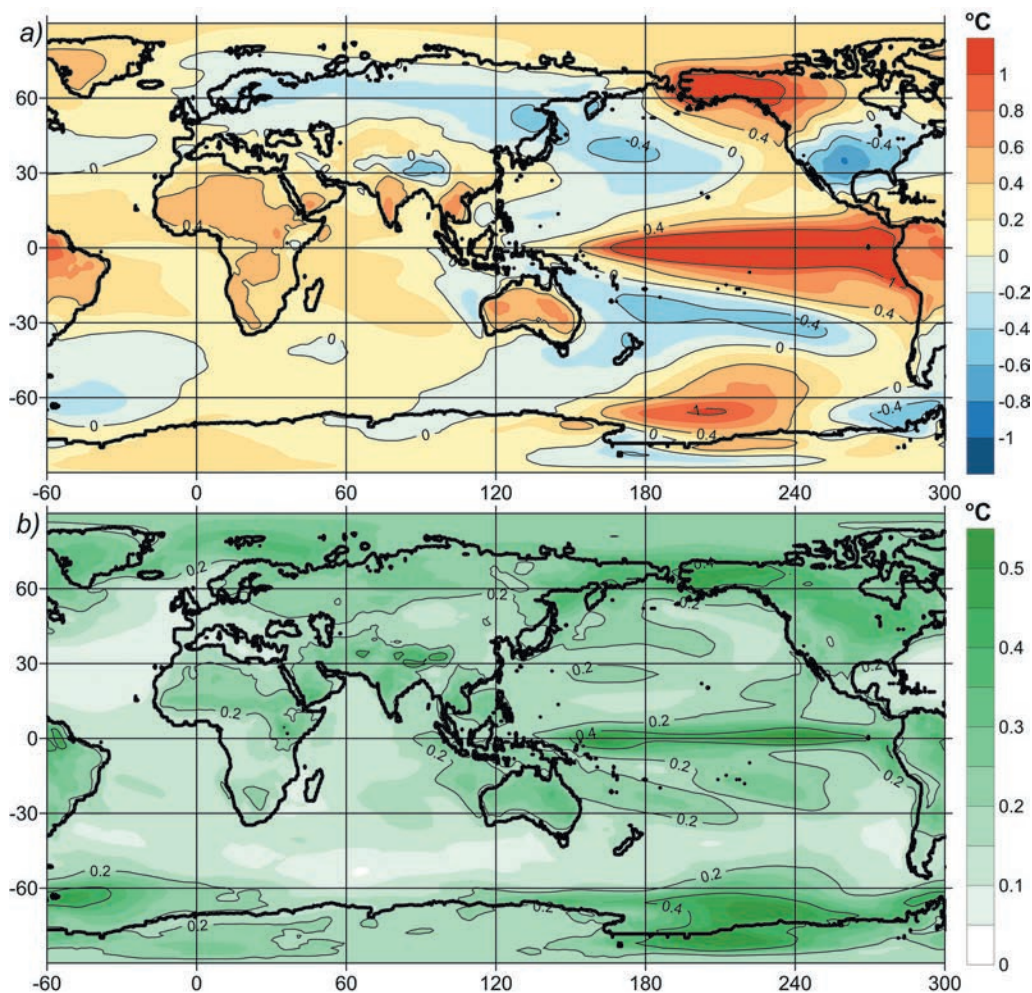


Рис. 2. Среднее поле разности аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) между противоположными фазами Эль-Ниньо — Южного колебания по индексу EONI для 50 моделей CMIP6 (a). Поле среднеквадратических отклонений амплитуд колебаний ТВП между противоположными фазами ЭНЮК для 50 моделей CMIP6 (b).

Fig. 2. The average field of the difference in surface air temperature (SAT) anomalies between opposite phases of the El Niño — Southern Oscillation according to the EONI index for 50 CMIP6 models (a). Field of standard deviations of SAT oscillation amplitudes between opposite ENSO phases for 50 CMIP6 models (b).

аномалий ДУМ на Эль-Ниньо совместной модели атмосферы и океана Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (Institute of Numerical Mathematics — INM) достаточно хорошо совпадает с полем ГАО ДУМ новой версии этой модели — INM-CM5-0 (рис. 3, f).

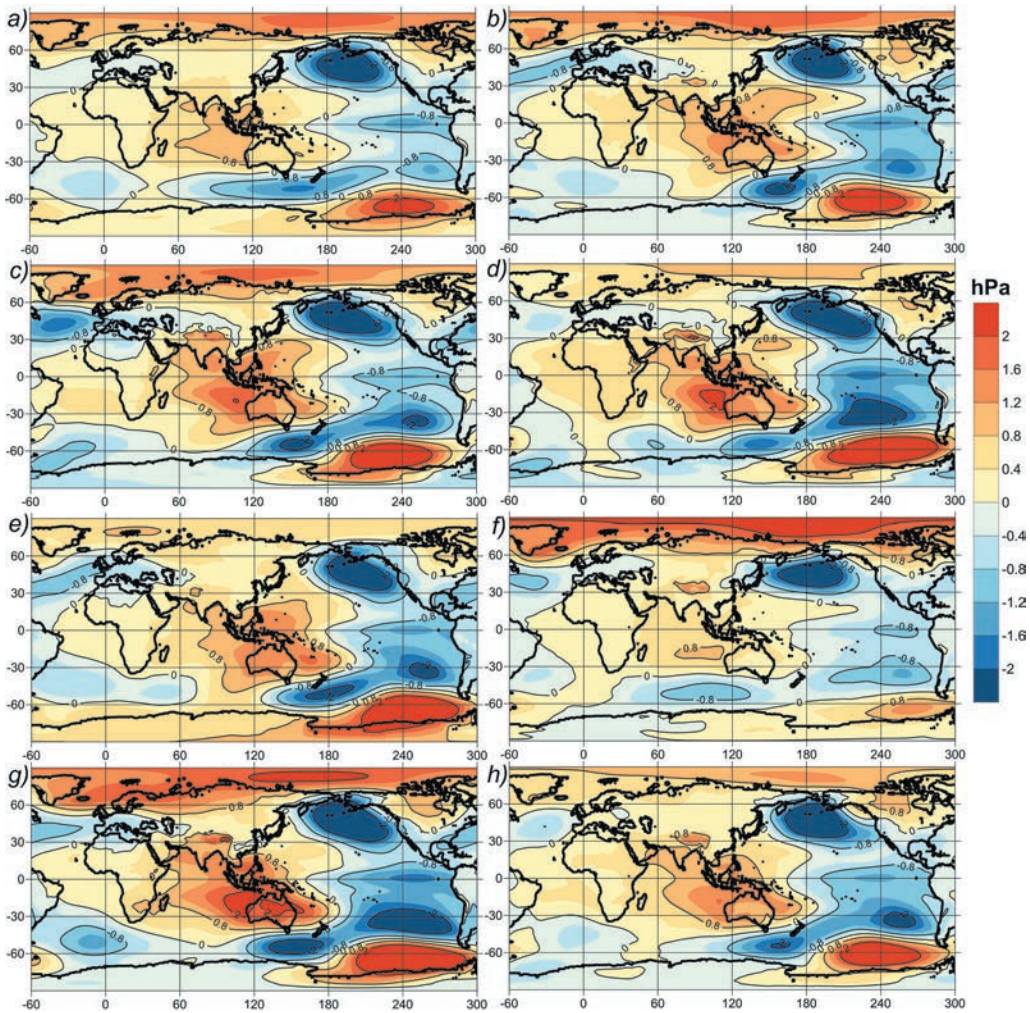


Рис. 3. Поля разности средних аномалий атмосферного давления на уровне моря между противоположными фазами Эль-Ниньо Южного колебания по индексу EONI для моделей: BCC-CSM2-MR (a), CNRM-ESM2-1 (b), EC-Earth3 (c), MIROC6 (d), HadGEM3-GC31-MM (e), INM-CM5-0 (f), NCAR CESM2 (g), NOAA GFDL-ESM4 (h).

Fig. 3. Fields of the difference in mean anomalies of atmospheric sea level pressure between the opposite phases of El Niño – Southern Oscillation according to the EONI index for the models: BCC-CSM2-MR (a), CNRM-ESM2-1 (b), EC-Earth3 (c), MIROC6 (d), HadGEM3-GC31-MM (e), INM-CM5-0 (f), NCAR CESM2 (g), NOAA GFDL-ESM4 (h).

Для поля ГАО ДУМ характерна X-образная структура отрицательных аномалий ДУМ с перекрестием на экваторе Тихого океана в районе 90° з.д. (рис. 3, рис. 4). Из этого перекрестия в четырех направлениях расходятся лучи

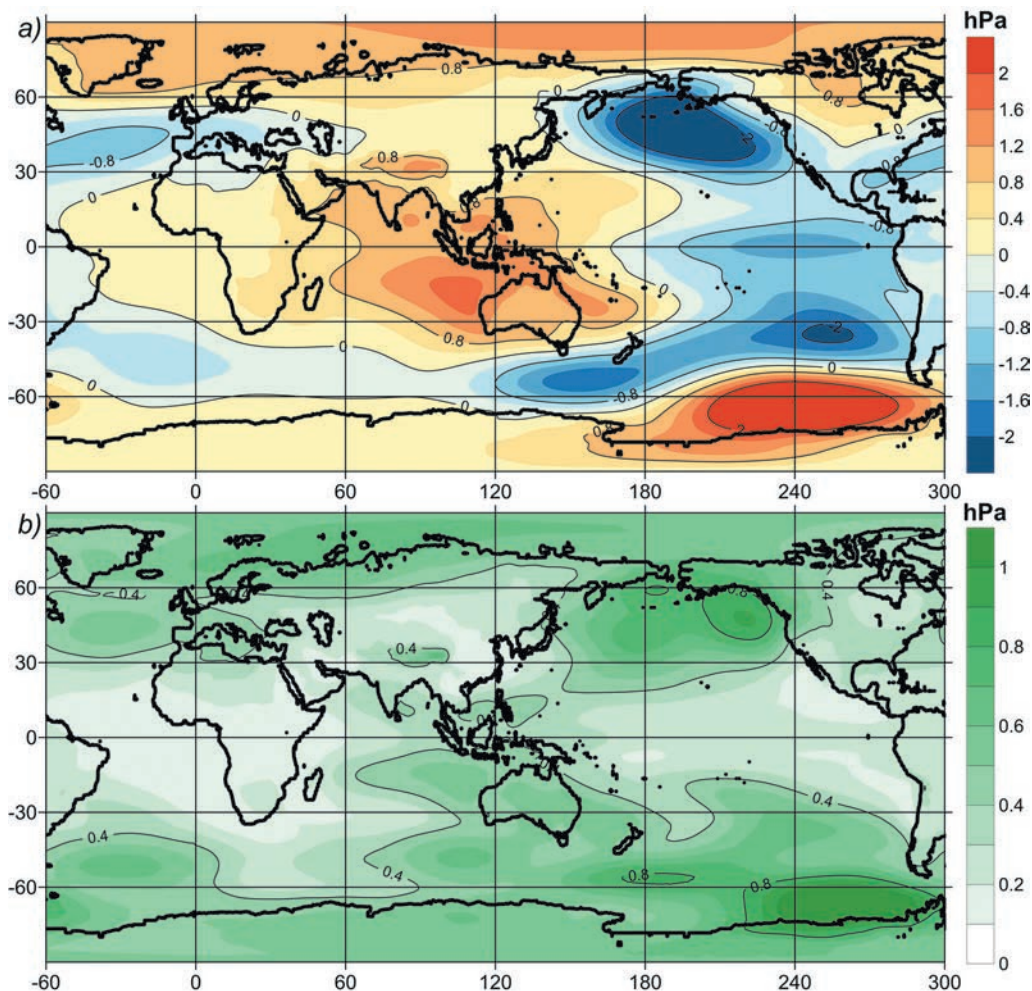


Рис. 4. Среднее поле разности средних аномалий атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) между противоположными фазами Эль-Ниньо — Южного колебания по индексу EONI для 50 моделей CMIP6 (a). Поле среднеквадратических отклонений амплитуд колебаний ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК для 50 моделей CMIP6 (b).

Fig. 4. The average field of the difference in sea level pressure (SLP) anomalies between opposite phases of the El Niño — Southern Oscillation according to the EONI index for 50 CMIP6 models (a). Field of standard deviations of SLP oscillation amplitudes between opposite ENSO phases for 50 CMIP6 models (b).

отрицательных аномалий ДУМ: на северо-запад вплоть до Чукотского полуострова, на северо-восток вплоть до Европы, на юго-запад и юго-восток вплоть до Антарктиды. Эти лучи отрицательных аномалий ДУМ охватывают обширный эллипсообразный регион положительных аномалий ДУМ с центром на экваторе

Индийского океана. Следует отметить, что лучи отрицательных аномалий ДУМ замыкаются только в Южном полушарии, и это замыкание происходит над океаном. В Северном полушарии между лучами отрицательных аномалий ДУМ существует разрыв над Азиатским континентом. По-видимому, данная особенность связана с важной ролью взаимодействия атмосферы и океана при формировании глобальной структуры поля ГАО ДУМ.

В высоких широтах к северу и югу от перекрестия (0° ш., 90° з.д.) лучей отрицательных аномалий ДУМ находятся очаги сильных положительных аномалий ДУМ, из которых эти аномалии распространяются в Арктику и Антарктику. При большой величине аномалий ДУМ в высоких широтах их межмодельная изменчивость также весьма велика (рис. 4, *b*). Самая низкая межмодельная изменчивость наблюдается над океанами в тропиках, что дополнительно свидетельствует о важности процессов взаимодействия атмосферы и океана в формировании пространственной структуры поля ГАО ДУМ и дальних связях ЭНЮК.

Обращает на себя внимание то, что из 50 рассмотренных моделей СМIP6 лучше воспроизводят пространственную структуру ГАО ДУМ те модели, которые также хорошо воспроизводят пространственную структуру ГАО ТВП. Таким образом, можно сделать вывод, что планетарные пространственные структуры полей ГАО ТВП и ГАО ДУМ взаимосвязаны. И модели, воспроизводящие планетарные пространственные структуры полей ГАО ТВП и ГАО ДУМ, хорошо описывают дальние связи ЭНЮК. Благодаря этому данные модели с более высокой точностью могут также воспроизводить дальние связи ЭНЮК и с другими гидрометеорологическими параметрами, такими как: температура океана на различных глубинах [26], осадки, ветер и влажность воздуха [27]. Но анализ воспроизведения моделями СМIP6 дальних связей ЭНЮК с этими и другими отличными от ТВП и ДУМ гидрометеорологическими параметрами требует отдельного исследования.

Чтобы оценить наличие в моделях СМIP6 дальних связей ЭНЮК с гидрометеорологическими параметрами вне тропиков Тихого океана применен метод асинхронного взаимного корреляционного анализа между EONI и тремя определенными в разделе «Методика исследования» индексами ГАО — GAO1, GAO2 и EGAO (табл. 2).

В таблице 2 представлены средние периоды колебаний между противоположными фазами индексов GAO1, GAO2 и EGAO. Метод определения этих фаз описан в разделе «Методика исследования». Средний период колебания вычислялся как удвоенное число лет эксперимента, деленное на общее количество положительных и отрицательных фаз данного индекса. Среднемодельными периодами колебаний оказались: GAO1 — 3,96 года, GAO2 — 4,39 года, EGAO — 4,81 года (таблица 2, столбцы 2, 5 и 8).

Среднемодельные периоды индексов ГАО оказались близки к среднемодельному периоду индекса ЭНЮК (4,68 года). При этом средний период индекса GAO1 меньше периода индекса GAO2, который, в свою очередь, меньше периода индекса EGAO. Из этого следует, что исключение тропической части из ГАО увеличивает средний период колебания оставшейся части ГАО.

Связи индексов ГАО и EONI исследуемых моделей CMIP6
 Links between GAO indices and EONI of the studied CMIP6 models

Название модели	Сред. период колебания GAO1 (годы)	Макс. корреляция GAO1 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO1 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания GAO2 (годы)	Макс. корреляция GAO2 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO2 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания EGAO (годы)	Макс. корреляция EGAO и EONI	Сдвиг при макс. корр. EGAO и EONI (месяцы)
AS-RCEC TaiESM1	3,92	0,77	0	4,22	0,60	0	4,59	0,44	3
AWI-CM-1-1-MR	4,27	0,63	0	4,22	0,42	1	4,88	0,29	1
BCC-CSM2-MR	3,77	0,69	1	4,17	0,50	2	4,71	0,30	1
BCC-ESM1	3,94	0,60	0	4,70	0,38	0	4,96	0,24	1
CAMS-CSM1-0	3,75	0,71	0	4,31	0,47	0	5,08	0,41	0
CAS-ESM2-0	3,77	0,75	0	4,25	0,59	0	4,78	0,38	1
CAS FGOALS-f3-L	3,57	0,80	1	4,11	0,58	1	4,37	0,51	1
CAS FGOALS-g3	3,48	0,76	1	3,97	0,59	1	4,22	0,44	1
CanESM5	3,97	0,67	-1	4,27	0,50	-1	5,14	0,29	-1
CanESM5-CanOE	4,17	0,68	-1	4,53	0,51	-1	4,86	0,28	0
CMCC-CM2-SR5	4,24	0,73	0	4,27	0,61	1	5,10	0,39	3
CMCC-ESM2	3,94	0,81	1	3,98	0,70	1	4,13	0,51	2
CNRM-CM6-1	3,80	0,67	0	4,69	0,39	-1	4,88	0,26	-1
CNRM-CM6-1-HR	4,26	0,64	0	4,76	0,33	-1	5,04	0,18	0
CNRM-ESM2-1	3,80	0,69	0	4,78	0,42	0	5,29	0,29	0
CSIRO ACCESS-CM2	3,53	0,74	0	4,12	0,49	-1	4,42	0,39	0
ACCESS-ESM1-5	3,85	0,68	0	4,05	0,45	1	4,80	0,27	0
E3SM-1-0	4,59	0,64	0	5,32	0,42	0	5,29	0,26	3
EC-Earth3	4,39	0,65	0	4,89	0,41	1	4,73	0,23	0
EC-Earth3-AerChem	4,35	0,57	-1	5,71	0,29	0	5,71	0,17	0
EC-Earth3-Veg	4,13	0,67	0	4,93	0,42	1	5,32	0,27	0
EC-Earth3-Veg-LR	3,93	0,62	0	4,66	0,35	1	5,09	0,23	1
FIO-ESM-2-0	4,23	0,72	1	4,37	0,55	1	5,25	0,34	3
MPI-ESM-1-2-HAM	4,25	0,60	0	4,42	0,41	1	4,44	0,31	0
INM-CM4-8	4,48	0,46	0	4,64	0,27	1	5,65	0,14	1
INM-CM5-0	4,42	0,47	0	4,80	0,27	0	5,01	0,16	0
IPSL-CM6A-LR	3,85	0,67	0	4,35	0,50	1	5,06	0,26	1
KIOST-ESM	3,82	0,75	0	4,52	0,50	0	4,48	0,41	0
MIROC-ES2L	4,13	0,79	0	4,13	0,52	1	4,67	0,37	2
MIROC6	4,21	0,78	0	4,40	0,58	0	5,03	0,37	0
HadGEM3-GC31-LL	3,60	0,72	0	4,50	0,51	0	4,59	0,36	1
HadGEM3-GC31-MM	3,55	0,75	0	4,27	0,48	0	4,76	0,36	0
MPI-ESM1-2-HR	4,50	0,66	-1	4,78	0,43	0	4,65	0,31	-1
MPI-ESM1-2-LR	4,18	0,68	0	4,30	0,47	0	4,55	0,37	0
MRI-ESM2-0	3,89	0,73	0	4,42	0,48	0	4,61	0,30	1

Название модели	Сред. период колебания GAO1 (годы)	Макс. корреляция GAO1 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO1 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания GAO2 (годы)	Макс. корреляция GAO2 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO2 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания EGAO (годы)	Макс. корреляция EGAO и EONI	Сдвиг при макс. корр. EGAO и EONI (месяцы)
NASA GISS-E2-1-G	3,44	0,77	-1	4,15	0,52	-3	4,27	0,48	-1
NASA GISS-E2-1-H	4,16	0,72	-1	4,89	0,43	0	4,83	0,42	0
NCAR CESM2	3,90	0,77	0	4,00	0,60	0	4,65	0,43	1
NCAR CESM2-FV2	3,66	0,78	1	3,85	0,61	1	4,03	0,51	3
CESM2-WACCM	4,04	0,73	0	4,25	0,55	0	4,97	0,38	2
CESM2-WACCM-FV2	3,47	0,81	1	3,40	0,66	1	3,68	0,56	3
NCC NorCPM1	3,75	0,78	1	3,89	0,64	1	3,85	0,51	2
NCC NorESM2-LM	3,88	0,78	1	4,01	0,59	1	4,64	0,45	1
NCC NorESM2-MM	3,69	0,77	1	4,12	0,58	1	4,74	0,41	1
NOAA GFDL-CM4	3,73	0,70	0	4,10	0,48	0	5,13	0,30	0
NOAA GFDL-ESM4	3,95	0,75	0	4,37	0,56	0	5,65	0,36	0
NUIST NESM3	4,39	0,66	-1	4,81	0,43	-1	5,71	0,33	-1
SAM0-UNICON	3,86	0,68	0	4,07	0,52	1	4,64	0,33	2
THU CIESM	4,15	0,71	0	4,41	0,50	1	4,72	0,37	3
UA MCM-UA-1-0	3,58	0,70	0	4,46	0,48	0	4,78	0,39	-1
Минимум	3,44	0,46	-1	3,40	0,27	-3	3,68	0,14	-1
Максимум	4,59	0,81	1	5,71	0,70	2	5,71	0,56	3
Среднее	3,96	0,70	0,1	4,39	0,49	0,3	4,81	0,35	0,8

Взаимные корреляции между EONI и индексами ГАО рассчитывались с шагом в 1 месяц со сдвигами от -60 до +60 месяцев. Найдены максимальные по модулю значения корреляций (таблица 2, столбцы 3, 6 и 9) и сдвиги, которым они соответствовали. Если указанный в таблице 2 (столбцы 4, 7 и 10) сдвиг максимальной корреляции положительный, это означает, что EONI опережает индекс ГАО, если отрицательный — значит EONI запаздывает относительно индекса ГАО. Практически все модели демонстрируют высокие корреляции между EONI и GAO1 — среднемодельная корреляция равняется 0,7. Это соответствует ожидаемому, поскольку GAO1 включает в себя регионы в тропиках Тихого океана, в которых по разности аномалий ДУМ вычисляется экваториальный индекс Южного колебания (Equatorial Southern Oscillation Index).

Для индекса GAO2 с исключёнными тропиками Тихого океана значения корреляций между ним и EONI меньше, чем между GAO1 и EONI. Среднемодельная корреляция равняется 0,49. Для индекса же EGAO, из которого исключен весь тропический пояс Земли, значения корреляций между ним и EONI становятся еще меньше по сравнению с предыдущими индексами и среднемодельная корреляция равняется 0,35. Таким образом, после того, как из ГАО были удалены низкие широты, величина связей ее оставшейся части с ЭНЮК уменьшилась.

Помимо планетарной структуры дальних связей, ЭНЮК характеризуется временной динамикой свойственной странному нехаотическому аттрактору (СНА) [32]. При СНА на нелинейную динамическую систему воздействуют две или более внешние квазипериодические силы с несоизмеримыми частотами колебаний — соотношение их периодов очень плохо аппроксимируется рациональными числами. Одним из примеров такого соотношения периодов является золотое сечение и его линейные преобразования. Из-за несоизмеримости этих периодов внешние силы воздействуют на систему как бы невпопад, и ее поведение кажется случайным, хотя на самом деле является нехаотическим. Спектральные оценки характеристик (индексов) такой системы демонстрируют пики на частотах, являющихся всевозможными комбинациями периодов внешних сил, воздействующих на систему. Благодаря этому такие спектры кажутся непрерывными, хотя они состоят из счетного числа пиков, между которыми существуют частоты с нулевыми энергиями колебаний.

Энергетические спектры EONI моделей CMIP6 и средний спектр по рассматриваемым 50 моделям отличаются от спектров СНА. На среднемодельном спектре EONI отсутствуют явно выраженные пики. При этом наблюдается повышение энергии колебаний от периода 2 года до периода приблизительно 4 года. Затем энергия колебаний начинает понижаться вплоть до периода приблизительно 20 лет, после чего это снижение замедляется. При этом наблюдается сильная межмодельная изменчивость спектров EONI.

На полученных ранее [32] спектрах индексов ЭНЮК и ГАО присутствуют пики на периодах супер- и субгармоник следующих внешних сил, воздействующих на глобальную климатическую систему: чандлеровское колебание полюсов Земли (период $\sim 1,2$ года), изменения солнечной активности (период $\sim 11,2$ лет) и лунно-солнечная нутация оси вращения Земли (период $\sim 18,6$ года). Форсинг данных внешних сил отсутствует в эксперименте *piControl*, и поэтому ярко выраженных пиков с указанными периодами на среднемодельном спектре CMIP6 не наблюдается.

Заключение

Рассмотренные 50 моделей CMIP6 имеют заметные различия между собой в следующих основных характеристиках Эль-Ниньо — Южного колебания (ЭНЮК): стандартное отклонение индекса ЭНЮК, его минимальное и максимальное значения, средний временной период между событиями, а также средняя продолжительность событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Некоторые из моделей CMIP6 воспроизводят основные характеристики ЭНЮК и асимметрию между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья с существенными отличиями от наблюдаемых по данным инструментальных измерений. Исходя из этого, можно заключить, что далеко не все модели CMIP6 воспроизводят ЭНЮК с высокой точностью.

Часть моделей CMIP6 довольно хорошо воспроизводит глобальную структуру поля амплитуды колебаний аномалий температуры воздуха у поверхности и атмосферного давления на уровне моря между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья,

симметричную относительно экватора с учетом расположения континентов. Причем, по сравнению с моделями CMIP5, число моделей в CMIP6, воспроизводящих глобальную структуру амплитуды колебаний аномалий ТВП и ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК, увеличилось. Таким образом, можно сделать вывод, что в моделях CMIP6 улучшилось описание дальних связей между ЭНЮК и исследуемыми метеорологическими полями вне тропиков Тихого океана по сравнению с моделями CMIP5.

Среднемодельные поля CMIP6 амплитуды колебаний аномалий ТВП и ДУМ между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья во многих деталях повторяют поля Глобальной атмосферной осцилляции, полученные ранее по данным измерений и реанализам. Межмодельная изменчивость полей оказалась выше над континентами, чем над океанами, что свидетельствует о существенной роли взаимодействия атмосферы и океана в формировании дальних связей ЭНЮК с исследуемыми метеорологическими полями вне тропиков Тихого океана.

Часть моделей CMIP6 демонстрирует высокие корреляции между ЭНЮК и аномалиями ДУМ вне тропиков Тихого океана. При этом наблюдаются существенные различия между рассмотренными 50 моделями CMIP6 в величинах корреляций, оценивающих внетропические дальние связи ЭНЮК.

Оценки энергетических спектров индекса ЭНЮК, полученных по моделям CMIP6, отличаются между собой, а также от спектров, полученных ранее по данным наблюдений, где фиксировались пики на периодах супер- и субгармоник внешних сил, воздействующих на климатическую систему. Таким образом, временная динамика ЭНЮК имеет существенные различия между моделями CMIP6, а также отличается от наблюдаемой по данным измерений. Причиной этого может являться то, что в эксперименте piControl, за исключением годового хода поступления тепла от Солнца, отсутствует воздействие других квазипериодических внешних сил, влияющих на глобальную климатическую систему.

Список литературы

1. McPhaden M. J., Santoso A., Cai W. et al. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Philander S. G. H. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, 1990: 289 p.
3. Johnson N. C., Wittenberg A. T., Rosati A. J. et al. Future changes in boreal winter ENSO teleconnections in a large ensemble of high-resolution climate simulations // *Front. Clim.* 2022. Vol. 4. 941055.
4. McGregor S., Cassou C., Kosaka Y., Phillips A. S. Projected ENSO teleconnection changes in CMIP6 // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49. e2021GL097511.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. P. 1937—1958.
6. Fredriksen H. B., Berner J., Subramanian A. C., Capotondi A. How does El Niño–Southern Oscillation change under global warming — A first look at CMIP6 // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. e2020GL090640.
7. Beobide-Arsuaga G., Bayr T., Reintges A. et al. Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models // *Clim. Dyn.* 2021. Vol. 56. P. 3875—3888.
8. Xie X., Zhou S., Zhang J., Huang, P. The Role of Background SST Changes in the ENSO-Driven Rainfall Variability Revealed from the Atmospheric Model Experiments in CMIP5/6 // *Atmos. Res.* 2021. Vol. 261. 105732.

9. Dieppois B., Capotondi A., Pohl B. et al. ENSO diversity shows robust decadal variations that must be captured for accurate future projections // *Commun Earth Environ.* 2021. Vol. 2. 212.
10. Zhao Y., Sun D. ENSO Asymmetry in CMIP6 Models // *J. Climate.* 2022. Vol. 35. P. 5555—5572.
11. Hou M., Tang Y. Recent progress in simulating two types of ENSO — from CMIP5 to CMIP6 // *Frontiers in Marine Science.* 2022. Vol. 9. 986780.
12. Liao H., Wang C., Song Z. ENSO phase-locking biases from the CMIP5 to CMIP6 models and a possible explanation // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 2021. Vol. 189—190. 104943.
13. Chen H., Jin F. Simulations of ENSO Phase-Locking in CMIP5 and CMIP6 // *J. Climate.* 2021. Vol. 34. P. 5135—5149.
14. Chen H.-C., Jin F.-F. Dynamics of ENSO phase-locking and its biases in climate models // *Geophysical Research Letters.* 2022. Vol. 49. e2021GL097603.
15. Brown J. R., Brierley C. M., An S. I. et al. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models // *Climate of the Past.* 2020. Vol. 16. P. 1777—1805.
16. McKenna S., Santoso A., Gupta A. S. et al. Indian Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. 11500.
17. Song G., Ren R. The Subsurface and Surface Indian Ocean Dipoles and Their Association with ENSO in CMIP6 models // *Adv. Atmos. Sci.* 2023. Vol. 40. P. 975—987.
18. Wang X. Y., Zhu J., Chang C. H. et al. Underestimated responses of Walker circulation to ENSO-related SST anomaly in atmospheric and coupled models // *Geosci. Lett.* 2021. Vol. 8. 17.
19. Chakravorty S., Perez R. C., Anderson B. T. et al. Testing the Trade Wind Charging Mechanism and Its Influence on ENSO Variability // *J. Climate.* 2020. Vol. 33. P. 7391—7411.
20. Pivotti V., Anderson B. T., Cherchi A. et al. North Pacific trade wind precursors to ENSO in the CMIP6 HighResMIP multimodel ensemble // *Clim. Dyn.* 2023. Vol. 60. P. 2501—2516.
21. Jian Y., Leung M. Y. T., Zhou W. et al. Present and Future Relations between ENSO and Winter Synoptic Temperature Variability over the Asian–Pacific–American Region Simulated by CMIP5/6 // *J. Climate.* 2021. Vol. 34. P. 9899—9913.
22. Hu J., Shen Y., Deng J. et al. Revisiting the Influence of ENSO on the Arctic Stratosphere in CMIP5 and CMIP6 Models // *Atmosphere.* 2023. Vol. 14. 785.
23. Коленикова М. А., Варгин П. Н., Гущина Д. Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа // *Метеорология и гидрология.* 2021. № 6. С. 5—23.
24. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А., Серых И. В. Эль-Ниньо как следствие Глобальной атмосферной осцилляции в динамике климатической системы Земли // *Доклады Академии наук.* 2012. Т. 446. № 1. С. 89—94.
25. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. и др. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // *Океанология.* 2016. Т. 56. № 2. С. 179—185.
26. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Interrelations between temperature variations in oceanic depths and the Global atmospheric oscillation // *Pure and Applied Geophysics.* 2020. Vol. 177. P. 5951—5967.
27. Серых И. В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // *Гидрометеорология и экология.* 2021. № 63. С. 329—370.
28. Серых И. В., Сонечкин Д. М. Взаимосвязь Эль-Ниньо — Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов Глобальной атмосферной осцилляции // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле.* 2022. Т. 67. № 4. С. 614—630.
29. Серых И. В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // *Океанологические исследования.* 2018. Т. 46. № 1. С. 14—28.
30. Planton Y. Y., Guilyardi E., Wittenberg A. T. et al. Evaluating Climate Models with the CLIVAR 2020 ENSO Metrics Package // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2021. Vol. 102. E193—E217.
31. Fasullo J. T., Phillips A. S., Deser C. Evaluation of Leading Modes of Climate Variability in the CMIP Archives // *J. Climate.* 2020. Vol. 33. P. 5527—5545.
32. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // *Theoretical and Applied Climatology.* 2019. Vol. 137. P. 2639—2656.
33. Матвеева Т. А., Гущина Д. Ю. Изменения характеристик центрально-тихоокеанского и восточно-тихоокеанского Эль-Ниньо в условиях потепления климата (по результатам экспериментов

- RCP 2.6 и RCP 8.5 CMIP5) // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 2. С. 86—110.
34. Serykh I. V., Sonechkin D. M., Byshev V. I. et al. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. Vol. 176. P. 3737—3755.
 35. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967. AU-15 (2). P. 70—73.
 36. Capotondi A., Wittenberg A. T., Newman M. et al. Understanding ENSO diversity // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. Vol. 96. P. 921—938.
 37. NOAA Climate Prediction Center, Cold & Warm Episodes by Season. Available at: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (accessed on: 31.07.2023).
 38. Малинин В. Н., Смирнов М. А. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 68. С. 463—477.
 39. Володин Е. М., Дианский Н. А. Воспроизведение Эль-Ниньо в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // *Метеорологии и Гидрологии*. 2004. №12. С. 5—14.

References

1. McPhaden M. J., Santoso A., Cai W. et al. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Philander S. G. H. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, 1990: 289 p.
3. Johnson N. C., Wittenberg A. T., Rosati A. J. et al. Future changes in boreal winter ENSO teleconnections in a large ensemble of high-resolution climate simulations. *Front. Clim.* 2022; (4): 941055.
4. McGregor S., Cassou C., Kosaka Y., Phillips A. S. Projected ENSO teleconnection changes in CMIP6. *Geophysical Research Letters*. 2022; (49): e2021GL097511.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 2016; (9): 1937—1958.
6. Fredriksen H. B., Berner J., Subramanian A. C., Capotondi A. How does El Niño–Southern Oscillation change under global warming — A first look at CMIP6. *Geophysical Research Letters*. 2020; (47): e2020GL090640.
7. Beobide-Arsuaga G., Bayr T., Reintges A. et al. Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models. *Clim. Dyn.* 2021;(56): 3875—3888.
8. Xie X., Zhou S., Zhang J., Huang, P. The Role of Background SST Changes in the ENSO-Driven Rainfall Variability Revealed from the Atmospheric Model Experiments in CMIP5/6. *Atmos. Res.* 2021;(261): 105732.
9. Dieppois B., Capotondi A., Pohl B. et al. ENSO diversity shows robust decadal variations that must be captured for accurate future projections. *Commun Earth Environ.* 2021;(2): 212.
10. Zhao Y., Sun D. ENSO Asymmetry in CMIP6 Models. *J. Climate*. 2022; (35): 5555—5572.
11. Hou M., Tang Y. Recent progress in simulating two types of ENSO – from CMIP5 to CMIP6. *Frontiers in Marine Science*. 2022;(9): 986780.
12. Liao H., Wang C., Song Z. ENSO phase-locking biases from the CMIP5 to CMIP6 models and a possible explanation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2021;(189—190): 104943.
13. Chen H., Jin F. Simulations of ENSO Phase-Locking in CMIP5 and CMIP6. *J. Climate*. 2021;(34): 5135—5149.
14. Chen H.-C., Jin F.-F. Dynamics of ENSO phase-locking and its biases in climate models. *Geophysical Research Letters*. 2022;(49): e2021GL097603.
15. Brown J. R., Brierley C. M., An S. I. et al. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models. *Climate of the Past*. 2020;(16): 1777—1805.
16. McKenna S., Santoso A., Gupta A. S. et al. Indian Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO. *Sci. Rep.* 2020;(10): 11500.
17. Song G., Ren R. The Subsurface and Surface Indian Ocean Dipoles and Their Association with ENSO in CMIP6 models. *Adv. Atmos. Sci.* 2023;(40): 975—987.

18. Wang X. Y., Zhu J., Chang C. H. et al. Underestimated responses of Walker circulation to ENSO-related SST anomaly in atmospheric and coupled models. *Geosci. Lett.* 2021;(8): 17.
19. Chakravorty S., Perez R. C., Anderson B. T. et al. Testing the Trade Wind Charging Mechanism and Its Influence on ENSO Variability. *J. Climate.* 2020;(33): 7391—7411.
20. Pivotti V., Anderson B. T., Cherchi A. et al. North Pacific trade wind precursors to ENSO in the CMIP6 HighResMIP multimodel ensemble. *Clim. Dyn.* 2023;(60): 2501—2516.
21. Jian Y., Leung M. Y. T., Zhou W. et al. Present and Future Relations between ENSO and Winter Synoptic Temperature Variability over the Asian–Pacific–American Region Simulated by CMIP5/6. *J. Climate.* 2021;(34): 9899—9913.
22. Hu J., Shen Y., Deng J., et al. Revisiting the Influence of ENSO on the Arctic Stratosphere in CMIP5 and CMIP6 Models. *Atmosphere.* 2023;(14): 785.
23. Kolennikova M. A., Gushchina D. Y., Vargin P. N. Interrelations between El Niño indices and major characteristics of polar stratosphere according to cimp5 models and reanalysis. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology.* 2021;(46): (351—364). (In Russ.)
24. Byshev V. I., Neiman V. G., Romanov Y. A., Serykh I. V. El Niño as a consequence of the global oscillation in the dynamics of the earth's climatic system. *Doklady Akademii nauk = Doklady Earth Sciences.* 2012;(446): (1089—1094).
25. Byshev V. I., Neiman V. G., Romanov Y. A. et al. Statistical significance and climatic role of the Global Atmospheric Oscillation. *Okeanologiya = Oceanology.* 2016;(56): (165—171).
26. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Interrelations between temperature variations in oceanic depths and the Global atmospheric oscillation. *Pure and Applied Geophysics.* 2020;(177): 5951—5967.
27. Serykh I. V. On the role of El Niño — Global Atmospheric Oscillation in the interannual variability of hydrometeorological processes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2021;(63): (329—370). (In Russ.)
28. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Link of El Niño — Southern Oscillation and Southern Annular Mode as elements of Global Atmospheric Oscillation. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences.* 2022;(67): (614—630). (In Russ.)
29. Serykh I. V. On the dynamics and structure of the Global atmospheric oscillation in climate models and reality. *Okeanologicheskiye issledovaniya = Journal of Oceanological Research.* 2018;(46): (14—28). (In Russ.)
30. Planton Y. Y., Guilyardi E., Wittenberg A. T. et al. Evaluating Climate Models with the CLIVAR 2020 ENSO Metrics Package. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2021;(102): 193—217.
31. Fasullo J. T., Phillips A. S., Deser C. Evaluation of Leading Modes of Climate Variability in the CMIP Archives. *J. Climate.* 2020;(33): 5527—5545.
32. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. *Theoretical and Applied Climatology.* 2019;(137): 2639—2656.
33. Matveeva T. A., Gushchina D. Y. Changes in the characteristics of the central pacific and eastern pacific El Niño under global climate warming (results of RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios of CMIP5). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology.* 2017;(2): (86—110). (In Russ.)
34. Serykh I. V., Sonechkin D. M., Byshev V. I. et al. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. *Pure and Applied Geophysics.* 2019;(176): 3737—3755.
35. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics.* 1967;(15): 70—73.
36. Capotondi A., Wittenberg A. T., Newman M. et al. Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015;(96): 921—938.
37. NOAA Climate Prediction Center, Cold & Warm Episodes by Season. Available at: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (accessed on: 31.07.2023).
38. Malinin V. N., Smirnov M. A. Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2022;(68):(463—477). (In Russ.)
39. Volodin E. M., Diansky N. A. El-Niño reproduction in coupled general circulation model of atmosphere and ocean. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology.* 2004;(12): (5—14). (In Russ.)

Информация об авторах

Илья Викторович Серых, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Физическое направление, Лаборатория крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей, iserykh@ocean.ru.

Дмитрий Михайлович Сонечкин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Физическое направление, Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, dsonech@yandex.ru.

Information about authors

Ilya V. Serykh, PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Department of Physics, Laboratory of Large-Scale Variability of Hydrophysical Fields.

Dmitry M. Sonechkin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Department of Physics, Laboratory of Ocean-Land Water Interaction and Anthropogenic Processes.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 28.08.2023

Принята к печати 01.11.2023

The article was received on 28.08.2023

The article was accepted 01.11.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 632—643.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):632—643.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 631.559.2:551.50
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-632-643

Оценка состояния сельскохозяйственных культур и прогноз их урожайности с использованием наземной и спутниковой информации

***Александр Дмитриевич Клещенко, Ольга Владимировна Савицкая,
Олег Владимирович Вирченко***

Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной
метеорологии, Обнинск, Россия, cxm-dir@obninsk.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке методов и технологий мониторинга состояния и оценки урожайности посевов зерновых культур на основе комплексирования спутниковой (вегетационные индексы) и наземной метеорологической информации, полученной со станций Росгидромета. На основе корреляционно-регрессионного анализа и метода главных компонент были разработаны соответствующие регрессионные модели, проверка которых показала хорошую сходимость между рассчитанными и фактическими данными.

Ключевые слова: урожайность, вегетационные индексы, метеорологическая информация, кластеризация, состояние посевов.

Для цитирования: Клещенко А. Д., Савицкая О. В., Вирченко О. В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур и прогноз их урожайности с использованием наземной и спутниковой информации // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 632—643. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-632-643.

METEOROLOGY

Original article

Assessment of the state of agricultural crops and forecast their yields using ground and satellite information

Alexander D. Kleshchenko, Olga V. Savitskaya, Oleg V. Virchenko

National Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia, cxm-dir@obninsk.ru

Summary. Estimations for grain crops state condition as well as their yield on the base of aggregation for remote sensing (vegetation indices) and ground meteorological information from Roshydromet agro-

meteorological stations are presented. Radiometer VIIRS from Suomi NPP satellite (four spectral channels with 375 m spatial resolution) provides data. Auxiliary information includes administrative regions and districts boundaries and underlying surface results classification according to the MODIS radiometer from Aqua and Terra satellites, and so others. The work of the technology includes the following basic procedures: the cloud free composition of satellite image from a decade period, the selection of pixels corresponding to the arable land, spectral signals normalization to a single interval, NDVI calculation, the use of a clustering procedure that allows evaluating different crops conditions. The results are presented in the form of cartograms, where crops with “bad”, “satisfactory” and “good” conditions are reflected in different colors. The vegetation indices NDVI and VCI are used as satellite information when grain crops yield assessing. Agrometeorological information is presented by the following parameters: average decadal values of temperatures and humidity deficiency, the sum of precipitation over a decade and the Selyaninov hydrometric coefficient. Correlation and regression analysis and the principal component method are used at research methods. Using correlation analysis, the links between meteorological, satellite parameters and the yield of grain crops are revealed. The principal component method allowed solving the problem of the presence of a high correlation interdependence between the variables under consideration. Corresponding regression models were obtained between the grain crops yield grain crops and meteorological and satellite parameters. Regression models were tested. The results of the calculations showed the advantage of regression on the main components in comparison with regression on the initial data.

Keywords: yield, vegetation indices, meteorological information, clustering, crop state.

For citation: Kleshchenko A. D., Savitskaya O. V., Virchenko O. V. Assessment of the state of agricultural crops and forecast their yields using ground and satellite information. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):632—643. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-632-643.

Введение

Своевременное обнаружение неблагоприятных условий, влияющих на рост и развитие посевов сельскохозяйственных культур, регулярная оценка их состояния и ожидаемой урожайности является одной из важнейших задач сельскохозяйственного мониторинга. В последние десятилетия для этих целей стала широко использоваться спутниковая информация различного пространственного разрешения. Это связано с существенным прогрессом в создании спутниковых систем и достаточно удобным доступом к получению информации. Кроме того, быстрое развитие производительности компьютерных систем позволяет в оперативном режиме обрабатывать большие объёмы информации.

Целью статьи является представление результатов исследования по вопросам оценки состояния и урожайности посевов зерновых культур на основе комплексирования спутниковой и наземной метеорологической информации.

Методы исследования

В работе представлено описание технологий оценки состояния и урожайности зерновых культур на основе интеграции спутниковых и метеорологических данных. В качестве методов исследований в технологии мониторинга состояния посевов зерновых культур использовался кластерный анализ, для ежедекадной оценки ожидаемой урожайности зерновых культур применялись корреляционный, регрессионный анализ и метод главных компонент.

Из методов кластерного анализа использовалась процедура многомерной неконтролируемой кластеризации, основанная на минимизации суммы сумм

квадратов евклидовых расстояний элементов кластеров от их центров. Эта процедура применялась для идентификации сельскохозяйственных объектов [1].

На основе корреляционного анализа проводилось выявление связей между метеорологическими, спутниковыми параметрами и урожайностью зерновых культур. С помощью метода главных компонент решалась задача сжатия информации и перехода в новую систему безразмерных ортогональных переменных. Регрессионный анализ применялся для построения статистических моделей связи урожайности зерновых культур с метеорологическими и спутниковыми параметрами.

Технология мониторинга состояния посевов зерновых культур

Во ВНИИСХМ Росгидромета работы по созданию технологий мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур были начаты в конце 80-х годов прошлого века, а с начала текущего века ведутся исследования по разработке методов оценки их урожайности [1, 2].

В первом варианте технологии ежедекадной оценки состояния в качестве входной информации использовались результаты спектрометрических измерений с радиометра «AVHRR». И хотя пространственное разрешение этой информации достаточно низкое (1,1 км), но доступность и оперативность получения данных, широта захвата территории, достаточная частота съёмки, надёжность и др. привели к ее широкому распространению в России и многих других странах. В настоящее время в качестве основного информационного источника используются данные с радиометра VIIRS ИСЗ Suomi NPP (четыре спектральных канала с пространственным разрешением 375 м, более высоким, чем у AVHRR). В качестве показателя, характеризующего состояние посевов сельскохозяйственных структур, используется широко известный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [3], представляющий собой частное от деления разности между коэффициентом отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра к их сумме. В качестве вспомогательной информации используются контуры административных образований и результаты классификации подстилающей поверхности по данным радиометра MODIS ИСЗ Aqua и Terra, называемые масками [4].

Задачи технологии мониторинга состояния посевов зерновых культур состоят из следующих этапов:

- получение композитов (среднее спутниковое изображение за декаду, составленное из фрагментов снимков без облачности, представляется ФГБУ «НИЦ «Планета»);
- выделение на изображении пикселей, соответствующих пашне, по результатам классификации подстилающей поверхности [4];
- определение минимальных и максимальных спектральных значений выделенных пикселей;
- нормализация (приведение к интервалу 0,0 – 1,0) и расчет NDVI;
- применение к этим пикселям процедуры кластеризации на 19 кластеров по критерию минимизации внутри кластерной дисперсии, что позволяет достаточно надежно выделить почву без посева и сами посевы;

— выделение посевов с «хорошим», «удовлетворительным» и «плохим» состоянием посевов с учетом данных кластеризации и результатов наблюдений на сети агрометеорологических станций Росгидромета.

Ранее нами были проведены многочисленные исследования по оценке зависимости отражательных характеристик посевов сельскохозяйственных культур от их параметров состояния (густота стояния, растительная масса, площадь листовой поверхности) и урожайности в различные периоды вегетации. Это позволило установить критерии значений вегетационного индекса (кластеры), соответствующие посевам с плохим состоянием (с ожидаемой урожайностью менее 80 % от средней многолетней), с удовлетворительным (с урожайностью 80—115 % от средней многолетней) и с хорошим (с урожайностью более 115 % от средней многолетней). Таким образом, на выходе системы формируются картосхемы распределения зерновых культур с различным состоянием. Кроме того, на картосхеме отражаются территории, занятые водой, лесом и прочими землями. Полученные карты ежедневно оценивают состояние зерновых культур в разрезе субъектов, федеральных округов и России в целом регулярно передаются оперативным подразделениям УГМС и ГМЦ РФ для агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственных организаций.

В качестве примера на рис. 1 приведена оценка состояния посевов по Ростовской области на конец мая 2022 года.

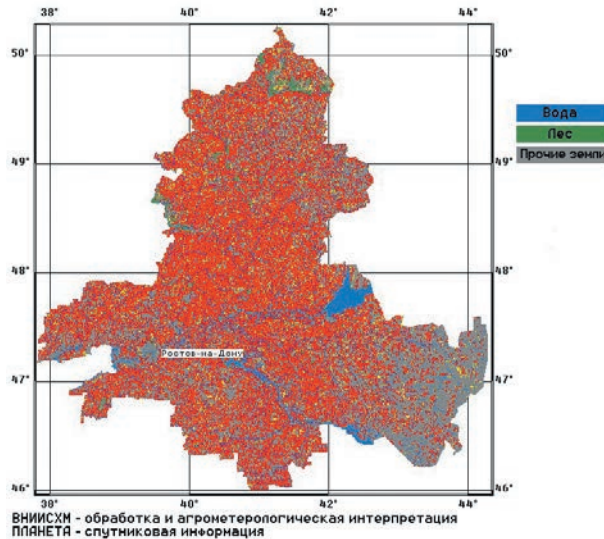


Рис. 1. Оценка состояния сельскохозяйственных культур за третью декаду мая 2022 года по Ростовской области (90 % — хорошее состояние, выделено красным цветом, 10 % — удовлетворительное состояние, желтый цвет).

Fig. 1. The agricultural crops state assessment for the 3rd decade of May 2022 in the Rostov region (90% — good condition — red, 10% — satisfactory condition — yellow).

Технология еженедельной оценки ожидаемой урожайности зерновых культур

Кроме технологии оценки состояния во ВНИИСХМ разработаны технологии еженедельной оценки ожидаемой урожайности зерновых культур на основе интеграции наземной метеорологической и спутниковой информации [2].

На начальном этапе в качестве основного подхода использовался корреляционно-регрессионный анализ. С его помощью строились статистические модели в виде уравнений регрессии, характеризующих зависимость урожайности от метеорологических и спутниковых параметров. Следует отметить, что регрессионные уравнения разрабатывались для агроклиматических групп районов. Районы объединялись в группы на основе карты агроклиматического районирования, разработанной Д. И. Шашко [5]. Все параметры были центрированы на среднее значение и нормированы на среднеквадратическое отклонение. В качестве примера в таблице 1 представлены многомерные регрессионные уравнения для групп районов Волгоградской области, полученных за период с 2012 г. по 2021 г.

Таблица 1

Регрессионные уравнения для групп районов Волгоградской области, полученных за период с 2012 г. по 2021 г.

Regression equations for groups of districts of the Volgograd region obtained for the period from 2012 to 2021.

Группа по Д. И. Шашко	Декада	Уравнение	R	Длина ряда
1	1 декада мая	$y = f(NDVI, T_3)$	0,79	133
2		$y = f(NDVI, D_3)$	0,77	159
3		$y = f(VCI)$	0,58	26
1	2 декада мая	$y = f(NDVI, D, ГТК)$	0,81	133
2		$y = f(NDVI, D_3, ГТК)$	0,82	159
3		$y = f(O_3, VCI)$	0,73	26
1	3 декада мая	$y = f(D_3, NDVI, T)$	0,81	133
2		$y = f(NDVI, D_3, D)$	0,81	159
3		$y = f(O_3, VCI)$	0,71	26
1	1 декада июня	$y = f(T_3, NDVI)$	0,70	133
2		$y = f(D_3, VCI)$	0,75	159
3		$y = f(ГТК, VCI)$	0,75	26

Примечание. y — урожайность озимой пшеницы (ц/га), NDVI — вегетационный индекс, VCI — индекс вегетационных условий, D — среднедекадный дефицит влажности воздуха (гПа), D_3 — средний дефицит влажности воздуха за 3 декады (гПа), T — средняя декадная температура воздуха (°C), T_3 — средняя температура воздуха за 3 декады (°C), O_3 — сумма осадков за декаду (мм), ГТК — гидротермический коэффициент Селянинова, R — коэффициент множественной корреляции.

Как видно из таблицы 1, для всех исследуемых декад и групп наблюдаются высокие коэффициенты множественной корреляции, что свидетельствует о высокой связи урожайности со спутниковыми и метеорологическими параметрами. Отметим, что в большинстве случаев в уравнения регрессии включен метеорологический и один спутниковый параметр. Включение в модель нескольких

спутниковых индексов и нескольких метеорологических параметров не представляется целесообразным, поскольку между ними присутствует высокая корреляционная зависимость, и оценки регрессии могут быть неустойчивы. Для решения этой проблемы и расширения списка входных параметров, оказывающих влияние на урожайность, использовался метод главных компонент, о котором будет рассказано ниже.

Разработанные регрессионные уравнения значимы на 5 % уровне по критерию Фишера, а коэффициенты уравнений значимы на 5 % уровне по критерию Стьюдента. Качество работы моделей оценивалось по относительной ошибке между фактическими и рассчитанными значениями урожайности. Относительная ошибка не превышала 15 % [2].

По указанным регрессионным моделям осуществлялся расчет ожидаемой урожайности на 2022 г. и строились картосхемы. Пример картосхемы рассчитанной урожайности озимой пшеницы (ц/га) для районов Волгоградской области для первой декады мая 2022 г. приведен на рис. 2. Нетрудно увидеть, что наиболее высокая урожайность ожидалась в северо-западной части области.

Однако, как упоминалось выше, из-за высокой степени взаимозависимости входных предикторов не все предикторы, оказывающие влияние на урожайность, включались в модель, что могло сказаться на результатах расчётов. При включении сильно коррелированных между собой параметров в регрессионную модель возникает проблема мультиколлинеарности, которая заключается в том, что детерминант системы нормальных линейных уравнений стремится к нулю, вследствие чего коэффициенты регрессии становятся неустойчивыми, ошибки их определения могут превышать значения самих коэффициентов. Кардинальным способом устранения этой проблемы является использование метода главных компонент (МГК). Кроме того, для расширения списка входных параметров, оказывающих влияние на ожидаемую урожайность, дополнительно применялся метод проекции на латентные структуры (ПЛС) [2, 6, 7]. МГК хорошо известен, поэтому не нуждается в объяснениях. При построении проекционного пространства, в отличие от МГК, при ПЛС моделировании учитывается связь между X (исходными параметрами) и Y (урожайностью). В методе ПЛС при проецировании данных получают новые переменные, которые наилучшим образом объясняют зависимую переменную. Эти новые переменные называются латентными переменными и являются линейной комбинацией исходных переменных. Вес в ПЛС-модели получают те исходные переменные, которые наиболее коррелированы с изменением урожайности.

В работе реализация методов МГК и ПЛС выполнена с помощью пакета Matlab.

В ходе исследования была сформирована база данных метеорологической, спутниковой и статистической информации за период с 2012 г. по 2021 г. В состав метеорологической информации включены следующие параметры: осредненные за одну и три декады температура воздуха, дефицит влажности воздуха, сумма осадков; рассчитанный по данным трех декад гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). В качестве данных дистанционного зондирования использовались наиболее распространенные спутниковые индексы NDVI (Normalized

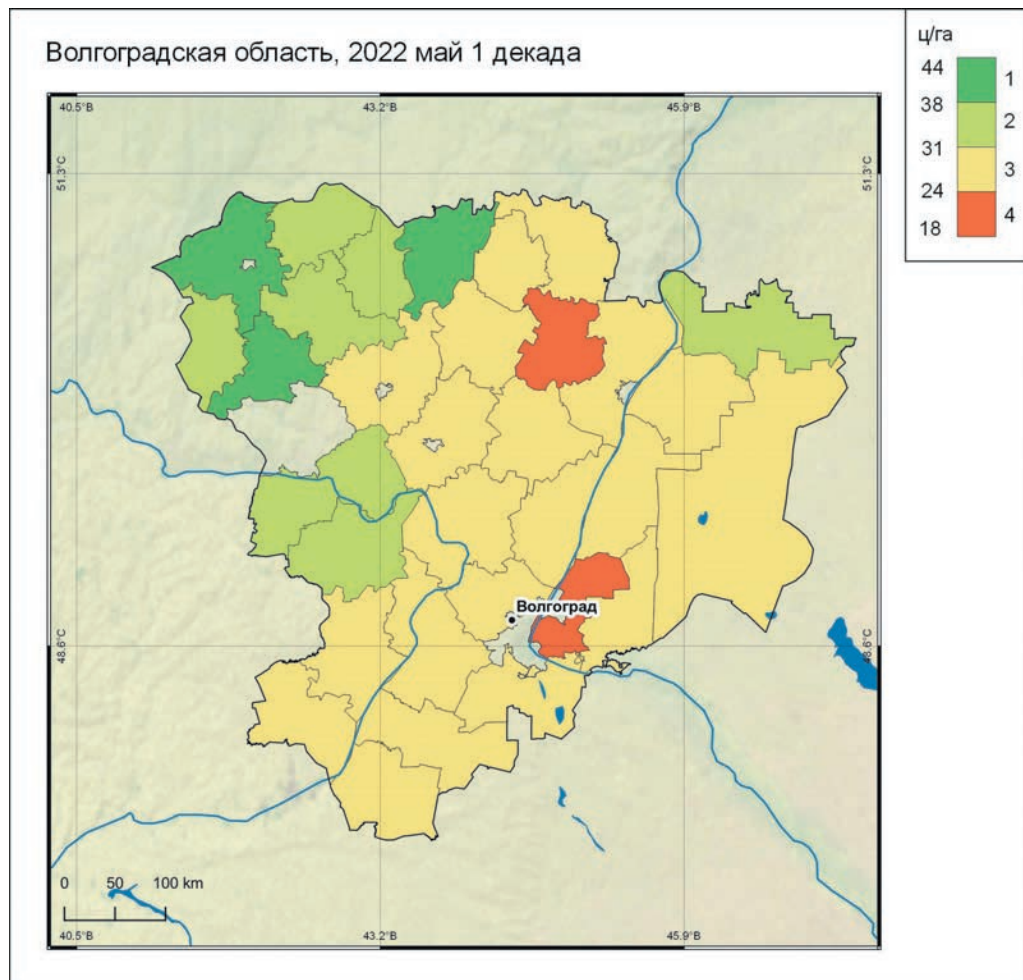


Рис. 2. Рассчитанная урожайность озимой пшеницы (ц/га) для районов Волгоградской области для первой декады мая 2022 г.

Fig. 2. Winter wheat calculated yield (c/ha) for Volgograd region districts at the first decade of May 2022.

difference vegetation index), VCI (Vegetation Condition Index). О NDVI сказано выше, а VCI является производным от индекса NDVI и представляет собой процентное отношение значений NDVI за определенное время к максимальной амплитуде изменений значений NDVI за рассматриваемый период времени [8, 9, 10]. Эти индексы рассчитаны на основе данных, полученных со спектрорадиометра Modis, и доступны на сайте ВЕГА-ПРО ИКИ РАН (<http://pro-vega.ru>). Статистическая информация представляет собой значения средней районной урожайности озимой пшеницы, доступные на сайте Федеральной службы государственной

статистики [11]. Исследования проводились в период с мая по первую декаду июня. Этот период очень важен для роста и развития озимой пшеницы. Хорошие гидротермические условия этого периода оказывают существенное влияние на урожайность зерна.

На первом этапе для выявления связей между переменными и урожайностью для каждой декады были рассчитаны корреляционные матрицы. По результатам расчетов выявлены высокие коэффициенты корреляции между урожайностью и практически всеми исследуемыми параметрами. Следует отметить, что параметры так же коррелируются между собой. Для устранения мультиколлинеарности с помощью метода главных компонент и метода проекции на латентные структуры коррелируемые переменные заменялись совокупностью новых, между которыми корреляция отсутствует. Новые переменные являются линейными комбинациями исходных параметров. Для дальнейшего анализа отбирались те компоненты, чьи собственные значения превышают единицу. Последним этапом анализа является построение уравнений регрессии с помощью МГК и ПЛС методов. В данном исследовании в качестве предикторов в уравнении регрессии в основном использовались первая и вторая главные компоненты. Эти компоненты объясняют более 90 % общей дисперсии исходных данных. Для примера в таблице 2 показано, какой процент дисперсии исходных данных объясняют первая и вторая компоненты для групп районов Волгоградской области с 1 декады мая по 1 декаду июня.

Таблица 2

Дисперсии (%) исходных данных, объясняемые первой и второй компонентами для групп районов Волгоградской области с 1 декады мая по 1 декаду июня за период 2012—2021 гг.

Variance (%) of the initial data, explained by the first and second components for groups of districts of the Volgograd region from the 1st decade of May to the 1st decade of June for the period 2012–2021

Группа по Д. И. Шашко	Декада	Дисперсия, (%)		
		Номер главной компоненты		Сумма компонент
		1	2	
1	1 декада мая	61,1	30,7	91,9
2		58,3	38,1	96,3
3		99,5	–	99,5
1	2 декада мая	85,1	11,7	96,9
2		82,0	12,4	94,4
3		76,1	23,8	99,8
1	3 декада мая	77,0	14,0	90,9
2		73,0	20,8	93,8
3		77,3	22,3	99,6
1	1 декада июня	77,8	20,3	98,1
2		77,0	18,8	95,8
3		82,2	17,5	99,7

В предыдущих наших исследованиях первая компонента определялась в основном спутниковыми индексами, вторая компонента характеризовалась

метеорологическими параметрами [2]. Однако для Волгоградской области первая компонента связана с метеорологическими параметрами, а вторая компонента — со спутниковыми. В таблице 3 в качестве примера показаны коэффициенты корреляции между исходными параметрами и главными компонентами для первой группы районов Волгоградской области в 1 декаде мая.

Таблица 3

Теснота связи между исходными параметрами и главными компонентами для первой группы районов Волгоградской области

The closeness of the relationship between the initial parameters and the main components for the first group of districts of the Volgograd region

Переменная	Номер компоненты	
	Компонента 1	Компонента 2
NDVI	-0,05	0,99
VCI	-0,09	0,99
T ₃	-0,88	-0,02
O ₃	0,97	0,04
ГТК	0,97	0,03

В таблице 4 показаны коэффициенты уравнений, полученные по МГК и ПЛС методам, для групп районов Волгоградской области за период с 2012 г. по 2021 г. Чтобы полученные уравнения было легче интерпретировать относительно исходных данных, осуществлено преобразование коэффициентов регрессии на главные компоненты в коэффициенты с исходными параметрами.

Таблица 4

Уравнения, полученные по МГК и ПЛС методам, для групп районов Волгоградской области за период с 2012 г. по 2021 г.

Equations obtained using the PCA and PLS methods for groups of districts of the Volgograd region for the period from 2012 to 2021.

Метод	Группа по Д. И. Шашко	Декада	Уравнение	R	Длина ряда
МГК	1	1 декада мая	$y = f(\text{ГТК}, O_3, T_3, \text{NDVI}, \text{VCI})$	0,83	133
ПЛС			$y = f(\text{ГТК}, O_3, \text{NDVI}, \text{VCI}, T_3)$	0,84	133
МГК	2		$y = f(\text{NDVI}, \text{VCI}, T_3, D_3)$	0,85	159
ПЛС			$y = f(\text{NDVI}, \text{VCI}, D_3, T_3)$	0,86	159
МГК	3		$y = f(\text{VCI}, \text{NDVI})$	0,76	26
ПЛС			$y = f(\text{VCI}, \text{NDVI})$	0,76	26
МГК	1	2 декада мая	$y = f(\text{ГТК}, D, T_3, \text{NDVI}, \text{VCI})$	0,88	133
ПЛС			$y = f(T_3, \text{VCI}, D, \text{ГТК}, \text{NDVI})$	0,88	133
МГК	2		$y = f(\text{VCI}, \text{NDVI}, T_3, D_3, \text{ГТК})$	0,85	159
ПЛС			$y = f(\text{NDVI}, \text{VCI}, \text{ГТК}, D_3, T_3)$	0,86	159
МГК	3		$y = f(\text{ГТК}, O_3, \text{NDVI}, \text{VCI})$	0,81	26
ПЛС			$y = f(O_3, \text{ГТК}, \text{VCI}, \text{NDVI})$	0,82	26

Окончание табл. 4

Метод	Группа по Д. И. Шашко	Декада	Уравнение	R	Длина ряда
МГК	1	3 декада мая	$y = f(T_3, D_3, NDVI, VCI, T)$	0,91	133
ПЛС			$y = f(T, NDVI, VCI, T_3, D_3)$	0,92	133
МГК	2		$y = f(D_3, T_3, D, NDVI, VCI)$	0,83	159
ПЛС			$y = f(D, NDVI, VCI, D_3, T_3)$	0,85	159
МГК	3		$y = f(ГТК, O_3, NDVI, VCI)$	0,76	26
ПЛС			$y = f(ГТК, O_3, VCI, NDVI)$	0,76	26
МГК	1	1 декада июня	$y = f(VCI, NDVI, D_3, T_3)$	0,83	133
ПЛС			$y = f(VCI, NDVI, T_3, D_3)$	0,83	133
МГК	2		$y = f(VCI, NDVI, D_3, ГТК)$	0,76	159
ПЛС			$y = f(VCI, NDVI, D_3, ГТК)$	0,76	159
МГК	3		$y = f(ГТК, O_3, NDVI, VCI)$	0,78	26
ПЛС			$y = f(ГТК, O_3, VCI, NDVI)$	0,79	26

Примечание. Y — урожайность озимой пшеницы (ц/га), NDVI — вегетационный индекс, VCI — индекс вегетационных условий, D — среднедекадный дефицит влажности воздуха (гПа), D₃ — средний дефицит влажности воздуха за 3 декады (гПа), T — средняя декадная температура воздуха (°C), T₃ — средняя температура воздуха за 3 декады (°C), O₃ — сумма осадков за декаду (мм), ГТК — гидротермический коэффициент Селянинова, R — коэффициент множественной корреляции.

При сравнении уравнений из таблиц 1 и 4 можно наблюдать, что уравнения из таблицы 4 включают большее количество предикторов, а коэффициент множественной корреляции во всех случаях превышает коэффициент множественной корреляции для уравнений из таблицы 1.

В таблице 5 в качестве примера представлена относительная ошибка рассчитанных и фактических значений урожайности озимой пшеницы с 2012 г. по 2021 г. для районов Центрально-Черноземного УГМС.

Таблица 5

Относительная ошибка (%) рассчитанных и фактических значений урожайности озимой пшеницы с 2012 г. по 2021 г. для районов Центрально-Черноземного УГМС

Relative error (%) of calculated and actual values of winter wheat yield from 2012 to 2021 for the areas of the Central Chernozem UGMS

Субъект	Группа по Д. И. Шашко	Метод							
		1 декада мая		2 декада мая		3 декада мая		1 декада июня	
		МГК	ПЛС	МГК	ПЛС	МГК	ПЛС	МГК	ПЛС
Белгородская	1	7,5	7	7,6	7,4	8,6	8,1	9,2	9,1
Липецкая	1	12,6	11,6	13,3	11,8	12,6	10,4	15,8	14,9
Курская	1	14,7	13,7	12,6	12,6	10,2	10,0	11,6	11,6
Воронежская	1	8,0	8,0	10,0	9,7	11,8	11,1	14,3	11,5
Воронежская	2	11,5	10,5	12,0	11,7	11,5	11,5	14,0	14,0

Как видно из таблицы 5, в большинстве случаев относительная ошибка расчета ожидаемой урожайности ниже при использовании метода проекции

на латентные структуры. Это связано с тем, что декомпозиция матрицы X (исходных параметров) происходит с учетом корреляции с Y (урожаем), что позволяет получить более точную модель.

Заключение

Исследования показали, что спутниковая информация является очень важной составляющей при мониторинге состояния посевов и оценке ожидаемой урожайности зерновых культур. Разработанная технология мониторинга состояния зерновых культур позволяет ежедекадно получать карты распределения количественной оценки их состояния для территорий субъектов, федеральных округов и России в целом. Использование этой информации позволило повысить точность оценок и получить более детальную характеристику состояния посевов зерновых культур.

Разработанные технологии ежедекадной оценки ожидаемой урожайности зерновых культур позволили впервые получать информацию условий формирования урожайности на районном уровне. Подобная информация помимо повышения качества агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственных организаций может быть использована при оценке страховых случаев, но для этого необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

1. Клещенко А. Д., Вирченко О. В., Савицкая О. В. Спутниковый мониторинг состояния и продуктивности посевов зерновых культур // Труды ВНИИСХМ. 2013. Вып. 38. С. 54—70.
2. Клещенко А. Д., Савицкая О. В. Оценка урожайности озимой пшеницы с использованием метода главных компонент на основе комплексирования спутниковой и наземной информации // Метеорология и Гидрология. 2021. № 12. С. 127—136. doi: 10.52002/0130-2906-2021-12-127-136.
3. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite) / In Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite Symposium. Greenbelt. ON. Canada. 10—14 December. 1973. P. 309—317.
4. Global Map data archives: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://globalmaps.github.io> (дата обращения 05.04.2023).
5. Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос, 1967. 336 с.
6. Peng-Peng Zhang, Xin-Xing Zhou, Zhi-Xiang Wang et al. Using HJ-CCD image and PLS algorithm to estimate the yield of field-grown winter wheat // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. № 5173. P. 1—10.
7. Мещерская А. В., Руховец Л. В., Юдин М. И., Яковлева Н. И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 199 с.
8. Kogan F. N. NOAA/AVHRR satellite data-based indices for monitoring agricultural droughts / In: Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Oxford, University Press. 2005. P. 79—89.
9. Kogan F.N. Remote sensing of weather impact on vegetation in non-homogeneous areas // International Journal of Remote Sensing. 1990. 11. No 8. P. 1405—1419. doi:10.1080/01431169008955102.
10. Щербенко Е. В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т.2. С. 409—419.
11. База данных показателей муниципальных образований. Федеральная служба государственной статистики: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (дата обращения 05.04.2023).

References

1. Kleshchenko A. D., Virchenko O. V., Savitskaya O. V. Satellite monitoring of the state and productivity of grain crops. *Trudy VNIISKhM = Proceedings of the All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology*. 2013; (38): (54—70). (In Russ.).

2. Kleshchenko A. D., Savitskaya O. V. Assessment of winter wheat yield using the principal component method based on the integration of satellite and ground information. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2021; (12): (127—136). doi: 10.52002/0130-2906-2021-12-127-136. (In Russ.).
3. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite) *In Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*. Greenbelt. ON. Canada. 10—14 December. 1973: 309—317.
4. Global Map data archives. Available at: <https://globalmaps.github.io> (accessed on: 05.04.2023).
5. Shashko D. I. *Agroklimaticheskoe raionirovanie SSSR = Agro-climatic zoning of the USSR*. М.: Kolos, 1967: 336 p. (In Russ.).
6. Peng-Peng Zhang, Xin-Xing Zhou, Zhi-Xiang Wang et al. Using HJ-CCD image and PLS algorithm to estimate the yield of field-grown winter wheat. *Scientific Reports*. 2020; 10(5173): 1—10.
7. Meshcherskaya A. V., Rukhovets L. V., Yudin M. I., Yakovleva N. I. *Estesvennyye sostavlyayushchie meteorologicheskikh polei = Natural components of meteorological fields*. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 199 p. (In Russ.).
8. Kogan F. N. NOAA/AVHRR satellite data-based indices for monitoring agricultural droughts. *In: Monitoring and Predicting Agricultural Drought*. Oxford. University Press. 2005: 79—89.
9. Kogan F. N. Remote sensing of weather impact on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*. 1990; 11(8):1405—1419. doi: 10.1080/01431169008955102.
10. Shcherbenko E. V. Remote methods for detecting agricultural drought. *Sovremennye problemy dstantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Contemporary problems of remote sensing of the Earth from space*. 2007; (2): (409—419). (In Russ.).
11. Baza dannykh pokazatelei munitsipal'nykh obrazovaniy. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Available at: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (accessed on: 05.04.2023).

Информация об авторах

Александр Дмитриевич Клещенко, доктор географических наук, профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, главный научный сотрудник, sxm-dir@obninsk.ru.

Ольга Владимировна Савицкая, кандидат географических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, научный сотрудник, mov1985@mail.ru.

Олег Владимирович Вирченко, кандидат физико-математических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, ведущий научный сотрудник, v--oleg@yandex.ru.

Information about authors

Alexander Dmitrievich Kleshchenko, Dr. of Sci. (Geogr.), professor, National Research Institute of Agricultural Meteorology, chief scientific.

Olga Vladimirovna Savitskaya, PhD (Geogr. Sci.), National Research Institute of Agricultural Meteorology, researcher.

Oleg Vladimirovich Virchenko, PhD (Phys. and Math. Sci.), National Research Institute of Agricultural Meteorology, leading researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 07.11.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 07.11.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 644—652.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):644—652.

Научная статья
УДК 551.591:551.501.8
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-644-652

Методика уточнения пространственного распределения значений метеорологической дальности видимости на основе данных радиолокационных и наземных измерений

Илья Евгеньевич Кузнецов, Сергей Александрович Дьяков, Дмитрий Владимирович Булгин

Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, vaiumet@mail.ru.

Аннотация. В работе предлагается методика уточнения поля видимости с использованием информации об осадках на основе вариационного анализа данных о радиолокационной отражательной способности на первом уровне высоты и наземных измерений видимости с учетом физико-географических и климатических особенностей района исследования. Показано, что предлагаемая методика позволяет уточнять значения видимости в различных точках пространства с точностью от 0,6 км до 1,8 км в зависимости от количества станций наземных метеорологических наблюдений.

Ключевые слова: видимость, интенсивность осадков, радиолокационная отражательная способность, вариационный анализ.

Для цитирования: Кузнецов И. Е., Дьяков С. А., Булгин Д. В. Методика уточнения пространственного распределения значений метеорологической дальности видимости на основе данных радиолокационных и наземных измерений // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 644—652. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-644-652.

Original article

Methodology for clarifying the spatial distribution of meteorological visibility range values based on radar and ground measurements

Ilya E. Kuznetsov, Sergey A. Dyakov, Dmitry V. Bulgin

Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia.

Summary. Currently, information about the meteorological visibility range (MVR) is relevant and allows us to assess the possibility of using aviation in various meteorological conditions. The MVR in the work is understood as the maximum distance determined at the meteorological station, from which unlit objects are visible and identified during the day and light landmarks at night. Its spatial and temporal variability is caused by many factors, including precipitation. Therefore, in order to obtain visibility data, it is necessary to use remote sensing methods of the atmosphere using meteorological radars (MR), information

from which has its advantages and disadvantages. The most important advantage is the ability to obtain information about meteorological magnitudes over a sufficiently large area with good spatial and temporal resolution. The purpose of this study is to improve the quality of meteorological information on the spatial distribution of the values of the MVR by developing a methodology based on the coupling of radar and ground measurements.

At the first stage, based on ground-based observations obtained from weather stations and posts, the field of visibility values of the first approximation is restored using the spline interpolation method. Then, according to radar measurements of reflectivity, visibility values are calculated at each point in space (a 4x4 km cell). At the final stage, a variational analysis of radar and ground measurements of meteorological magnitudes is carried out. A distinctive feature of the proposed algorithm is taking into account the physical, geographical and climatic features of the study area, as well as the use of models for combining heterogeneous meteorological information based on radar and ground observations, taking into account measurement errors of meteorological parameters.

The implementation of this algorithm was carried out on the basis of archival data of radar measurements using meteorological radars of Krasnodar, Sochi, Anapa, Mineralnye Vody for the period from 2015 to 2020. The calculated results were compared with the measured values of the desired meteorological magnitude at meteorological stations not included in the general calculation. A numerical experiment conducted with real data in various synoptic situations has shown that the best result is observed when wet and drizzling precipitation falls. The presence of zones with cumulonimbus clouds leads to significant errors when specifying the values of the MDV, reaching values of 100—150 % of the initial value.

The analysis of the obtained results allows us to conclude that the proposed algorithm for constructing the field of view in precipitation based on radar and ground observations can be used in the operational prognostic practice of meteorological departments.

Keywords: visibility, precipitation intensity, radar reflectivity, variation analysis.

For citation: Kuznetsov I. E., Dyakov S. A., Bulgin D. V. Methodology for clarifying the spatial distribution of meteorological visibility range values based on radar and ground measurements. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):644—652. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-644-652.

Введение

В настоящее время информация о метеорологической дальности видимости (МДВ) является актуальной и позволяет оценить возможность применения авиации в различных метеорологических условиях. Под МДВ в работе понимается определенное на метеорологической станции максимальное расстояние, с которого видны и опознаются неосвещенные объекты днем и световые ориентиры ночью [1]. Ее пространственно-временная изменчивость обусловлена многими факторами, в том числе и выпадающими осадками. Для получения данных о видимости необходимо применение дистанционных методов зондирования атмосферы с использованием метеорологических радиолокаторов (МРЛ), информация с которых обладает определенными преимуществами и недостатками [2]. Наиболее важным преимуществом является возможность получения сведений о метеовеличинах на довольно большой территории, которые обладают достаточным пространственным и временным разрешением. Основным недостатком подобного рода данных является то, что они зависят от распределения частиц в облаках и осадках по размерам и от их фазового состояния, информация о которых носит стохастический характер. Также возникают существенные ошибки в определении радиолокационных характеристик облаков с удалением от метеорологической радиолокационной станции.

Хотя метеорологические станции и радиолокатор позволяют получить информацию по некоторой территории, генезис и пространственно-временные характеристики исходных данных настолько сильно различаются, что фактически мы имеем дело с различными источниками информации [3]. Поля с информацией об облаках и осадках, полученные по данным измерений на метеостанциях и МРЛ, являются разнородными и для их совместного анализа требуется использование специальных алгоритмов усвоения данных, например, на основе вариационного согласования.

Целью настоящего исследования является повышение качества информации о МДВ на основе использования вариационного анализа данных радиолокационных и наземных измерений с учетом физико-географических и климатических особенностей района исследования.

Материалы и методы исследования

В процессе разработки методики учитывались архивные данные радиолокационных измерений с использованием МРЛ г. Краснодар, г. Сочи, г. Анапа, г. Минеральные Воды за период с 2015 г. по 2020 г.

Методика уточнения пространственного распределения видимости с учетом информации об интенсивности осадков

В работе предлагается методика уточнения пространственного распределения значений МДВ с учетом информации об осадках на основе статистических зависимостей между данными радиолокационных измерений отражательной способности метеообъектов, полученных с метеорологической радиолокационной станции, и значениями МДВ (V), определенными на метеостанциях.

Предлагаемая методика реализуется следующим образом:

1. По данным наземных измерений, полученных с метеостанций и постов, восстанавливается поле значений МДВ с использованием метода сплайновой интерполяции на основе выражения [4]:

$$V_{(x,y)} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{i,j} x^i y^j, \quad (1)$$

где a — значения коэффициентов полинома, x и y — координаты метеостанции.

Пример построения полученного поля значений МДВ для типовой синоптической ситуации при прохождении холодного фронта первого рода на территории Краснодарского края 28 ноября 2018 года представлен на рисунке 1.

2. По радиолокационным данным выделяются зоны с осадками и проводится их классификация (дождь, морось и т.д.). По результатам измерения отражательной способности (Z) на первом уровне высоты в каждой точке пространства (квадрате со стороной 4 км) рассчитываются значения интенсивности осадков по формуле [2, 5, 6]:

$$I=10^{\frac{1}{\beta} \lg \frac{Z}{\alpha}}, \quad (2)$$

где I — интенсивность осадков, мм/ч, α и β — коэффициенты, учитывающие характер метеорологического явления, ухудшающего видимость.

Зная информацию об интенсивности осадков, значения МДВ можно определить по формуле [1]:

$$V_{(x,y)}=V_0 I^{-0,71}, \quad (3)$$

где V_0 — видимость при отсутствии осадков, км.

Подставляя (2) в (3), получим значения МДВ в осадках:

$$V_{(x,y)}=V_0 \cdot 10^{\frac{-0,71}{\beta} \lg \frac{Z}{\alpha}}. \quad (4)$$

При отсутствии возможности измерений отражательной способности на первом уровне по высоте производится её определение по алгоритму, представленному в работе [7].

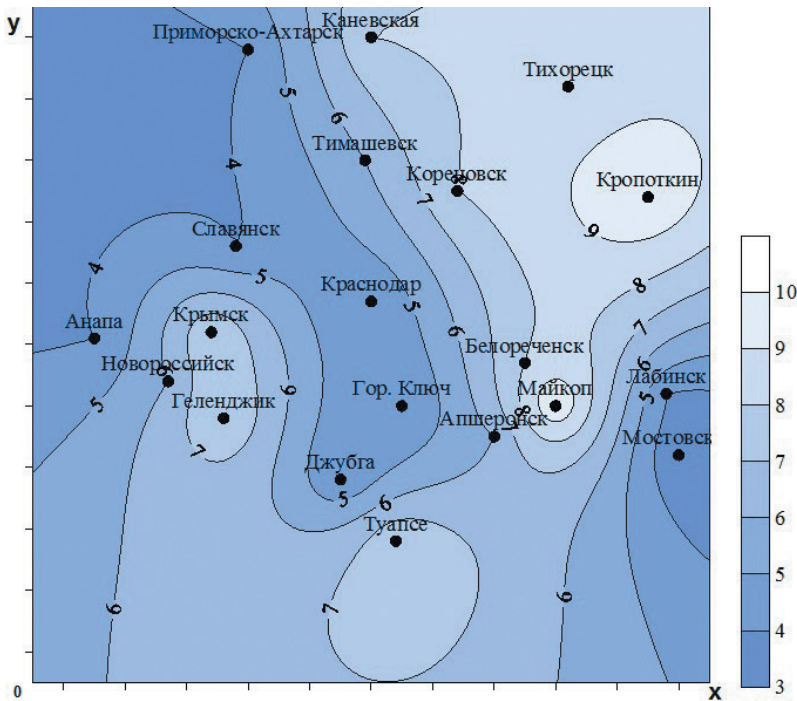


Рис. 1. Поле значений метеорологической дальности видимости, построенное по данным наземных измерений.

Fig. 1. The field of values of the meteorological range of visibility, constructed from ground-based observations.

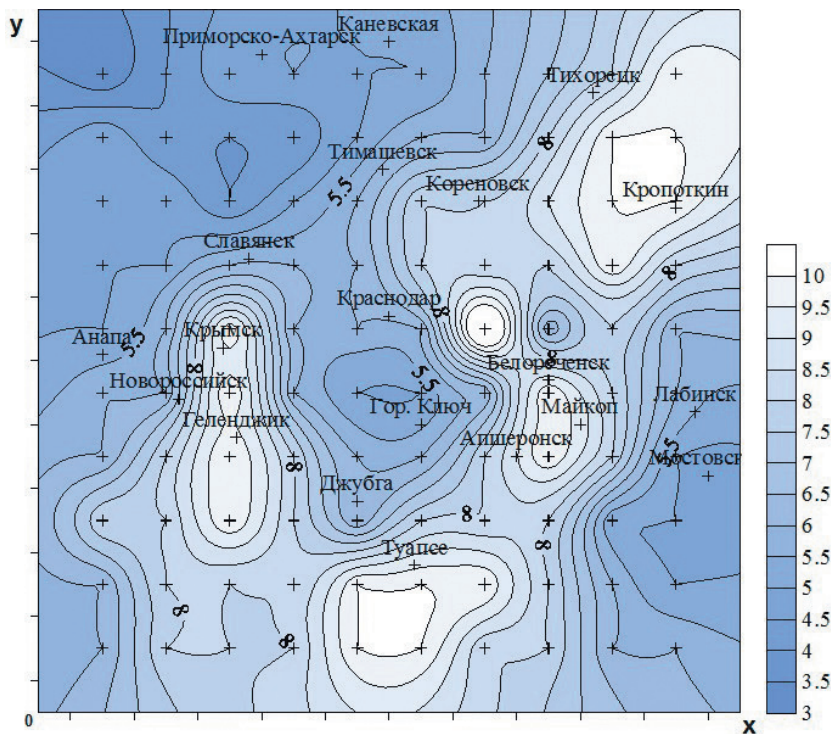


Рис. 2. Поле значений метеорологической дальности видимости, построенное по радиолокационным данным.

Fig. 2. The field of values of meteorological visibility range, constructed from radar data.

Затем восстанавливается поле по радиолокационным данным. Пример реализации предлагаемого подхода для типовой синоптической ситуации при прохождении холодного фронта первого рода на территории Краснодарского края 28 ноября 2018 года представлен на рисунке 2.

3. Далее выполняется вариационный анализ данных радиолокационных и наземных измерений метеовеличин с использованием модели [8, 9]:

$$J = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_i}^{y_{i+1}} \left[A(V_{(x,y)} - V_{0(x,y)})^2 + B(V_{(x,y)} - V_{1(x,y)})^2 + C \left(\frac{\partial(V_{(x)} - V_{1(x)})^2}{\partial x} + \frac{\partial(V_{(y)} - V_{1(y)})^2}{\partial y} \right) \right] dx dy \rightarrow \min, \quad (5)$$

где V — искомое значение МДВ, которое является конечным результатом процедуры вариационного согласования, км; V_0 — значение МДВ с учетом информации от сети метеорологических станций, км; V_1 — значение МДВ, полученное по данным радиолокационных измерений, км; A, B, C — весовые коэффициенты,

определяющие вклад каждого из слагаемых в вариационный анализ; x и y — координаты точки пространства, в которой определяется МДВ.

Коэффициенты A , B , C должны быть обратно пропорциональными ковариационным матрицам ошибок (A^{-1} , B^{-1} , C^{-1}), где A^{-1} — ковариационная матрица ошибок стационарных измерений, B^{-1} , C^{-1} — ковариационные матрицы ошибок радиолокационных измерений. Однако из-за отсутствия такого рода информации коэффициенты подбирались из выполнения условий минимизации ошибок анализа.

После варьирования функционала (5) с использованием уравнения Эйлера—Лагранжа получим:

$$A(V_{(x,y)} - V_{0(x,y)})^2 - B(V_{(x,y)} - V_{1(x,y)})^2 - C \left(\frac{\partial(V_{(x)} - V_{1(x)})^2}{\partial x} + \frac{\partial(V_{(y)} - V_{1(y)})^2}{\partial y} \right) = 0, \quad (6)$$

Решение уравнения (6) осуществляется с использованием итерационной процедуры. Построение поля МДВ выполнялось при помощи процедуры интерполяции на основе использования весовых функций. При этом значение МДВ в каждой точке сетки (x,y) определялось по формуле:

$$V_{(x,y)} = \frac{\sum_{k=1}^N V_k w_k}{\sum_{k=1}^N w_k}, \quad (7)$$

где N — количество станций наблюдения; V_k — значение МДВ, определенное на станции, км; w_k — весовой множитель, определяющий вклад k -ой станции в поле МДВ для точки (x,y) , определяемый по формуле:

$$w_k = e^{-\gamma V_k^2}, \quad (8)$$

где γ — коэффициент пространственной автокорреляции МДВ.

На основе предлагаемой формулы (5) были проведены численные эксперименты по повышению точности поля МДВ по данным радиолокационных и наземных измерений на территории Краснодарского края, в результате которых были подобраны оптимальные коэффициенты A , B , C .

Пример для типовой синоптической ситуации при прохождении холодного фронта первого рода на территории Краснодарского края 28 ноября 2018 года представлен на рисунке 3.

Оценка точности результатов, полученных с использованием предлагаемой методики, осуществлялась по данным наземных измерений в каждой точке путем расчета следующих показателей: среднеквадратическая $\sigma(V)$ и средняя абсолютная $\delta(V)$ ошибки, коэффициенты вариации внутри исследуемых областей $C_v(V)$ с использованием данных, не включенных в общий расчет. Результаты оценки качества предлагаемой методики, представляющие собой среднюю по полю ошибку восстановления значений МДВ, представлены в таблице 1.

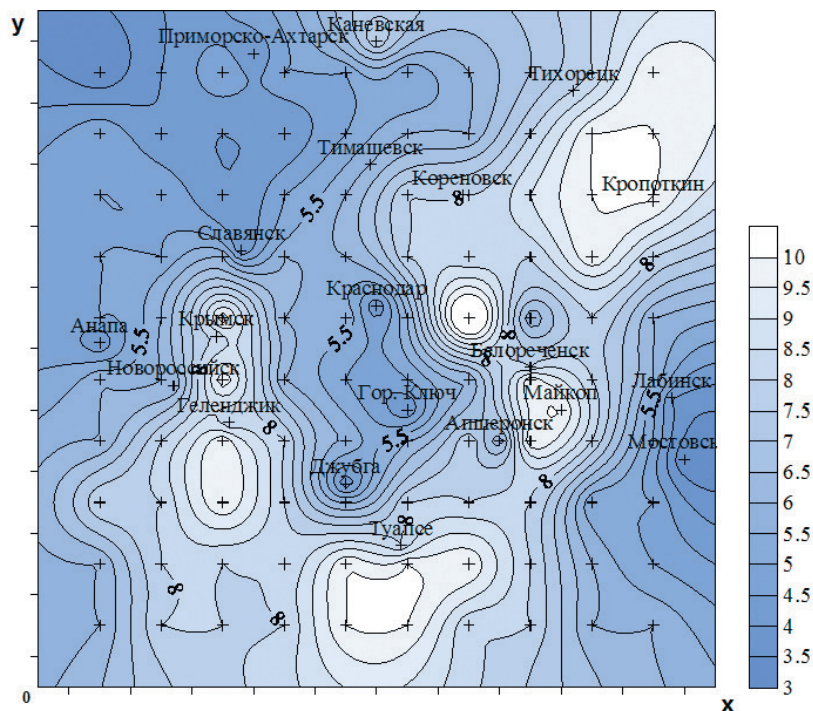


Рис. 3. Поле значений метеорологической дальности видимости, построенное по комплексным данным.

Fig. 3. The field of values of meteorological visibility range, constructed from complex data.

Таблица 1

Статистические характеристики точности аппроксимации поля видимости с учетом информации об осадках на территории Краснодарского края
 Statistical characteristics of the accuracy of the approximation of the field of view, taking into account information about precipitation in the Krasnodarskiy kray

Количество пунктов наблюдений	$\sigma(V)$, км	$a(V)$, км	$\delta(V)$, км	$C_v(V)$, км
10	1,23	1,8	2,0	0,62
15	0,55	0,8	0,9	0,45
20	0,45	0,6	0,7	0,39

Анализ данных таблицы 1 показывает, что количество включенных в расчет метеорологических станций существенно влияет на точность пространственного восстановления МДВ. При этом качество полученных результатов также зависит от плотности их распределения. Особенно ярко это проявляется при наличии над территорией исследования внутримассовых и замаскированных кучево-дождевых облаков.

Выводы

Предложенная в работе методика пространственного распределения значений МДВ, основанная на статистических зависимостях между радиолокационной отражаемостью метеообъектов и данными наземных измерений МДВ, а также на моделях вариационного анализа и сплайновой интерполяции этих данных, позволяет повысить точность пространственной аппроксимации МДВ по значениям средней абсолютной ошибки от 0,6 км до 1,8 км, по значениям среднеквадратического отклонения от 0,45 км до 1,23 км при размещении станций наземных измерений в районе исследования с равномерной плотностью в количестве от 10 до 20 шт.

Численный эксперимент, проведенный с реальными данными при различных синоптических ситуациях, показал, что получение наилучшего результата наблюдается при выпадении обложных и морозящих осадков. Наличие зон с кучево-дождевой облачностью приводит к значительным ошибкам при уточнении значений МДВ, достигающим значений 100—150 % от исходной величины.

Список литературы

1. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
2. Билетов М. В., Тищенко А. И., Кузнецов И. Е. Радиолокационная метеорология. Часть 1. Основы радиолокационной метеорологии. М.: Воениздат, 2008. 332 с.
3. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозных процессов и выявления зон обледенения в облаках на основе комплексного использования методов активной и пассивной радиолокации // Ученые записки РГГМУ. 2021. Вып. 62. С. 7—21. doi: 10.33933/20742762202162726.
4. Расселл Д. Бикубическая интерполяция. М.: Книга по требованию, 2013. 38 с.
5. Жуков В. Ю., Рыков М. С., Шукин Г. Г. Экспериментальная проверка нового радиолокационного метода оценивания интенсивности осадков // Ученые записки РГГМУ. 2018. Вып. 52. С. 21—28.
6. Безрукова Н. А., Чернокульский А. В. Российские исследования облаков и осадков в 2015—2018 гг. Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 397—417. doi: 10.31857/S0002351520040021.
7. Кузнецов И. Е., Горбачев В. Д. Методика пространственно-временного анализа полей метеорологических величин в условиях ограничения метеоинформации // Научно-технический вестник Поволжья № 5, 2011. С. 98—102.
8. Клименко Д. Е. Оценка предельных максимумов дождевых осадков физическими методами на основе спутниковых и радиолокационных данных наблюдений. Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 443—452. doi: 10.31857/S0321059620040069.
9. Кузнецов И. Е., Первезенцев Р. Е. Методические аспекты восстановления метеорологических полей при комплексном использовании данных радиолокационных и аэросиноптических наблюдений // Навигация и гидрография. 2016. № 43 С. 57—63.

References

1. Bogatkin O. G. *Osnovy aviacionnoj meteorologii = Fundamentals of aviation meteorology*. St. Petersburg: Izd. RGGMU, 2009: 339 p. (In Russ.).
2. Biletov M. V., Tishchenko A. I., Kuznetsov I. E. *Radiolokacionnaja meteorologija = Radar meteorology. Part 1. Fundamentals of radar meteorology*. Moscow: Voениzdat, 2008: 332 p. (In Russ.).
3. Karavaev D. M., Shchukin G. G. Improving methods of early warning of the development of thunderstorm processes and identification of icing zones in clouds based on the integrated use of active and

- passive radar methods. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2021;(62):(7—21). (In Russ.). doi: 10.33933/20742762202162726.
4. Russell D. *Bikubicheskaja interpolacija = Bicubic interpolation*. Moscow: Kniga po trebovaniju, 2013: 38 p. (In Russ.).
 5. Zhukov V. Yu., Rykov M. S., Shchukin G.G. Experimental verification of a new radar method for estimating precipitation intensity. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018;(52): (21—28). (In Russ.).
 6. Bezrukova N. A., Chernokulsky A. V. Russian studies of clouds and precipitation in 2015—2018. *Izvestiya Rossijskoy akademii nauk. Pfizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and ocean physics*. 2020;(56): (397—417). (In Russ.). doi: 10.31857/S0002351520040021.
 7. Kuznetsov I. E., Gorbachev V. D. Methodology of spatial and temporal analysis of meteorological magnification fields in conditions of limited meteorological information. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolg'ja = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2011;(5):(98—102). (In Russ.).
 8. Klimenko D. E. Assessment of maximum rainfall maxima by physical methods based on satellite and radar observation data. *Vodnye resursy = Water resources*. 2020;(47):(443—452). (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059620040069.
 9. Kuznetsov I. E., Pervezentsev R. E. Methodological aspects of the restoration of meteorological fields with the integrated use of radar and aerosynoptic observations. *Navigatsija i gidrografija = Navigation and hydrography*. 2016;(43):(57—63). (In Russ.).

Информация об авторах

Илья Евгеньевич Кузнецов, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж), vaiumet@mail.ru.

Сергей Александрович Дьяков, канд. геогр. наук, заместитель начальника кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж), karino_1976@mail.ru.

Дмитрий Владимирович Булгин, канд. техн. наук, доцент кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж), d.bulgin77@yandex.ru.

Information about the authors

Ilya Evgenievich Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Hydrometeorological Support, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

Sergey Alexandrovich Dyakov, Candidate of Geological Sciences, Deputy Head of the Department Hydrometeorological Support, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

Dmitry Vladimirovich Bulgin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Hydrometeorological Support, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 23.11.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 23.11.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 653—665.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):653—665.

Научная статья

УДК [551.510.4:54-138]:551.501.816(470.23-25)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665

Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербург

Дмитрий Альбертович Самуленков, Максим Викторович Сапунов

СПбГУ, Научный парк, РЦ «Обсерватория экологической безопасности»,
Санкт-Петербург, e-mail: samulenkov_da@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты однократных измерений содержания аэрозольных частиц в атмосфере Выборгского района Ленинградской области и Санкт-Петербурга с использованием лидарных технологий. Измерения проводились в октябре 2020 года при схожем направлении ветра. Полученные данные сравниваются с целью оценки вертикальной структуры аэрозолей в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Установлено, что в Санкт-Петербурге содержание аэрозолей более чем в 3,5 раза выше, нежели в Выборгском районе. Высота насыщенного аэрозолевым слоем в Выборгском районе прослеживается до уровня 1200 м, в Санкт-Петербурге — до 2000 м. Максимальная концентрация аэрозольных частиц в Выборгском районе зарегистрирована на нижней границе наблюдений — 300 м и составляет 1260 ± 274 частиц в см^3 , в Санкт-Петербурге содержание аэрозолей на высоте 350 м — 4657 ± 1045 частиц в см^3 .

Ключевые слова: аэрозоль, лидар, экологическая безопасность, лидарное зондирование, стационарный лидарный комплекс, мобильный лидарный комплекс.

Благодарности: Работа выполнена с использованием оборудования РЦ «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ, исследование финансировалось Санкт-Петербургским государственным университетом, ID проекта: 101662710 (GZ_MDF-2023-1).

Для цитирования: Самуленков Д. А., Сапунов М. В. Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербург // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 653—665. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665.

Original article

Results of lidar monitoring in the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg

Dmitry A. Samulenkov, Maxim V. Sapunov

St. Petersburg State University, Research Park, Research Center “Environmental Safety Observatory”, St. Petersburg, Russia, samulenkov_da@mail.ru

Summary. The paper presents the results of single measurements of aerosol particle content in the atmosphere of the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg using lidar technologies. The

measurements were carried out in October 2020, with similar wind direction. The obtained data are compared in order to estimate the vertical structure of aerosols. The aerosol optical thickness, complex refractive index, numerical and volumetric concentration of aerosol particles are calculated, and the Angstrom parameter is given. The height of the aerosol saturated layer can be traced up to a height of 1200 m in the Vyborg district and up to 2000 m in St. Petersburg. At the same time, the aerosol content in St. Petersburg is significantly higher than in the Vyborg district. The maximum concentration of aerosol particles in Vyborgsky district is registered at the lower boundary of observations at 300 m — 1260 ± 274 particles per cm^3 , in St. Petersburg the aerosol content at a height of 350 m is 4657 ± 1045 particles per cm^3 . The increased aerosol content above the metropolis leads to additional aerosol load on the areas adjacent to St. Petersburg and results in spatial inhomogeneity of UV radiation input in St. Petersburg and the Leningrad region. The Angstrom parameter in Vyborgsky District is equal to 1.44 ± 0.24 , in St. Petersburg 1.91 ± 0.56 , which indicates the predominance of fine aerosol over the metropolis, which is more dangerous to public health compared to the coarse fraction. The lower concentration of aerosols in the Vyborg region, compared to St. Petersburg, is apparently due to the absence of large industrial enterprises and intensive traffic near the observation site in the Vyborg region, as well as the direction of movement of air masses — along the coast of the Gulf of Finland from the territory of Finland.

Keywords: aerosol, lidar, environmental safety, lidar sensing, stationary lidar complex, mobile lidar complex.

Acknowledgments: The work was carried out using the equipment of the RC «Observatory of Environmental Safety» of the Scientific Park of St. Petersburg State University and the research was funded by St. Petersburg State University, project ID: 101662710 (GZ_MDF-2023-1).

For citation: Samulenkov D. A., Sapunov M. V. Results of lidar monitoring in the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):653—665. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665.

Введение

Негативные изменения состояния окружающей среды и климата, возрастающая антропогенная нагрузка на экосистемы обуславливают необходимость контроля загрязнений. Согласно данным ВОЗ, смертность от загрязнения атмосферного воздуха достигает 7 миллионов человек в год [1]. Аэрозоль является одним из основных компонентов, оказывающих комплексное воздействие на здоровье человека, животных [2—4], внешний вид и состояние зданий и сооружений [5].

Состав пыли зависит от природной и антропогенной обстановки в регионе. В пограничном слое атмосферы до двух километров происходит активный обмен с поверхностью энергией и веществом, что ведет к образованию шапки загрязнений над мегаполисами [6,7]. Уровень загрязнения зависит от времени года и метеорологических параметров [8]. Безветренная погода усугубляет ситуацию, концентрации атмосферных аэрозолей достигают своего максимума, что может приводить к серьезным последствиям для здоровья населения. Пылевые частицы вместе с воздушными потоками переносятся на большие расстояния и могут влиять на качество жизни населения, проживающего за десятки, сотни, а порой и тысячи км от места образования аэрозолей [9—12].

Методы дистанционного контроля экологической безопасности окружающей среды позволяют оценивать содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, своевременно обнаруживать негативные изменения окружающей среды и выявлять потенциально опасные явления [13—15].

Методы лидарной диагностики состояния атмосферы начали развиваться в Советском Союзе в конце 60-х годов XX в., когда в СССР начали применять лазеры для измерения высоты нахождения облаков и измерения прозрачности атмосферы [16]. С развитием технологий метод стал активно применяться для исследования свойств аэрозолей, трансграничного переноса аэрозольных загрязнений [17—20].

Лидарные наземные измерения являются важной составляющей наблюдения за переносом аэрозолей [21—24]. Метод лидарного зондирования дает возможность получить вертикальный профиль параметров аэрозоля, дальнейшее моделирование — восстановить микрофизические свойства аэрозолей [25—28].

Основная цель данной работы — оценка содержания аэрозолей на удалении от г. Санкт-Петербург в Ленинградской области и сравнение с результатами измерения аэрозоля в центре Санкт-Петербурга, которые были выполнены в одном месяце при одинаковом направлении ветра. Исследования выполнялись в дневное время суток. Результаты получены с использованием мобильного и стационарного лидарных комплексов РЦ «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ. Выполненная работа позволила сравнить содержание аэрозолей в Ленинградской области и г. Санкт-Петербург в осенний сезон. Измерения выполнялись 17 октября 2020 г. в Выборгском районе и 10 октября 2020 г. в Санкт-Петербурге. Авторами определены аэрозольная оптическая толщина, комплексный показатель преломления, рассчитан показатель ангстрема, восстановлена численная концентрация и средний радиус аэрозольных частиц для двух площадок наблюдения.

Материалы и методы

Мобильный и стационарный лидарные комплексы (рис. 1) позволяют проводить натурные измерения аэрозолей и ветровых характеристик. В комплексах имеются аэрозольный и ветровой лидары. В основе аэрозольного лидара находится Nd:YAG лазер, который работает на длине волн: 355 нм, 532 нм и 1064 нм. Аэрозольный лидар имеет слепую зону высотой 300 м, связанную с особенностями оптического пути сигнала. Ветровой лидар позволяет измерять скорость и направление с 40 метров. В импульсном ветровом лидаре используется длина волны 1557 нм.

Для восстановления оптических параметров атмосферы использовалось основное уравнение лидарного зондирования:

$$P(z) = A \frac{\beta(z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right],$$

где $P(z)$ — мощность детектируемого обратно рассеянного сигнала с высоты z , A — аппаратная константа, $\beta(z)$ — коэффициент обратного рассеяния, $\alpha(z')$ — коэффициент ослабления.

Подробно характеристики мобильного и стационарного лидарных комплексов приведены в статье [29].



Рис. 1. Лидарные комплексы:

- a)* мобильный лидарный комплекс
б) стационарный лидарный комплекс на 10 линии Васильевского острова.

Fig. 1. Lidar complexes:

- a)* mobile lidar complex *b)* stationary lidar complex on the 10th line of Vasilievsky Island.

Методика исследования

Данные, полученные аэрозольным лидаром, были обработаны с использованием программного обеспечения Data Processing «ООО Оптосистемы», разработанного для СПбГУ. Программа предназначена для обработки данных многоволнового лидарного зондирования, сохраненных в файлах формата Licel или в текстовом формате. Программа позволяет управлять файлами, вычитать шум, вычислять профиль молекулярного рассеяния по заданным профилям давления и температуры, находить точку привязки, осреднять данные, вычислять оптические коэффициенты. Расчёт оптических параметров, выполненный по методу Клетта [30], позволяет восстановить параметры индустриального, морского и пустынного аэрозоля и продуктов горения биомассы с погрешностью до 20 процентов, которая зависит от состояния атмосферы, содержания и типа аэрозоля [31].

Способ расчета коэффициентов ослабления и обратного рассеяния аэрозоля по данным лидарного зондирования представлен в работе [32].

Результаты измерений

На рис. 2 приведен коэффициент ослабления, полученный на площадке наблюдений в Выборгском районе 17 октября 2020 г с 10.45 до 13.48, и в г. Санкт-Петербург, где измерения проводились 10 октября 2020 г. с 11.00 до 14.30. 10 и 17 октября 2020 года регистрировалось западное направление ветра.

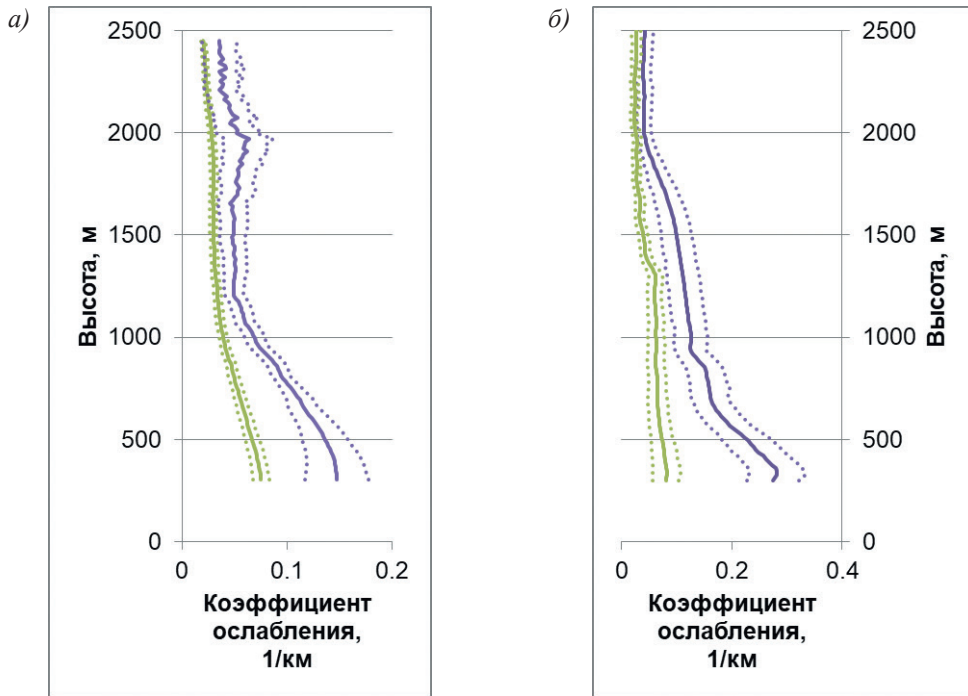


Рис. 2. Профили коэффициента ослабления на длинах волн 355 и 532 нм
 а) в Выборгском районе; б) в Санкт-Петербурге.

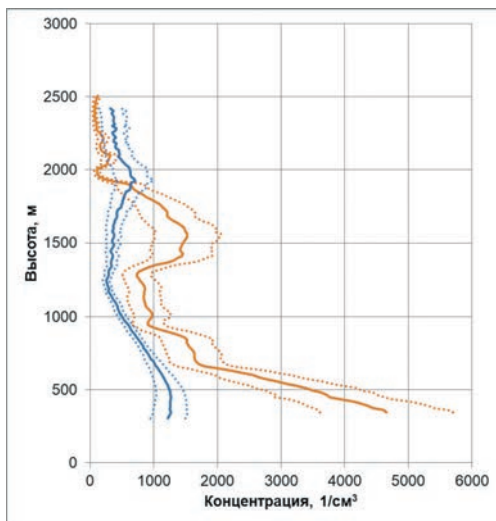
Fig. 2. Profiles of *a)* attenuation coefficient at wavelengths of 355 and 532 nm
 a) in the Vyborgsky district, b) in St. Petersburg

Восстановленные профили микрофизических параметров аэрозолей — численная, поверхностная и объемная концентрации частиц, действительная и мнимая части коэффициента преломления — представлены на рис. 3.

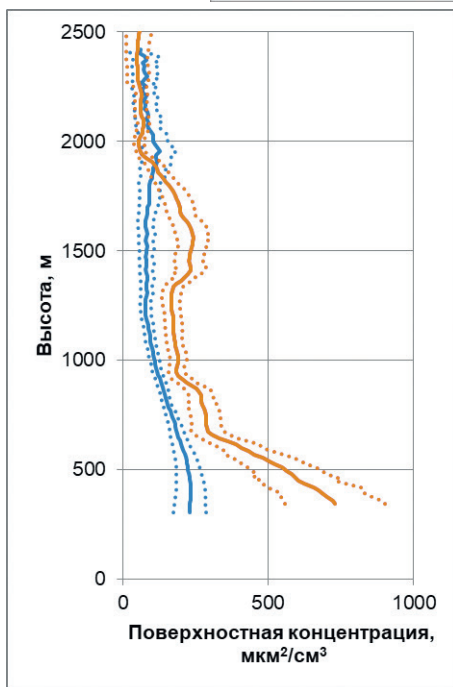
Коэффициент ослабления в Выборгском районе не превышал значений $0,15 \pm 0,03 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 355 нм и $0,075 \pm 0,008 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 532 нм. Повышенные значения коэффициента ослабления позволяют определить высоту нахождения насыщенного аэрозолем слоя. Максимальные значения отмечаются от нижней границы наблюдений на высоте 300 м до высоты 1200 м. Выше концентрация аэрозолей снижается. В тоже время в Санкт-Петербурге значения не превышали $0,28 \pm 0,05 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 355 нм и $0,08 \pm 0,02 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 532 нм. Максимальные значения коэффициента ослабления в Санкт-Петербурге зарегистрированы на высотах от 350 м до 2000 м.

Максимальное значение численной концентрации аэрозолей в Выборгском районе наблюдалось на нижней границе наблюдений — 300 м и составляло около $1260 \pm 274 \text{ частиц в см}^3$. На высотах от 1200 до 2400 м можно отметить наличие аэрозольного слоя с максимальной численной концентрацией на высоте 1900 м

a)



б)



в)

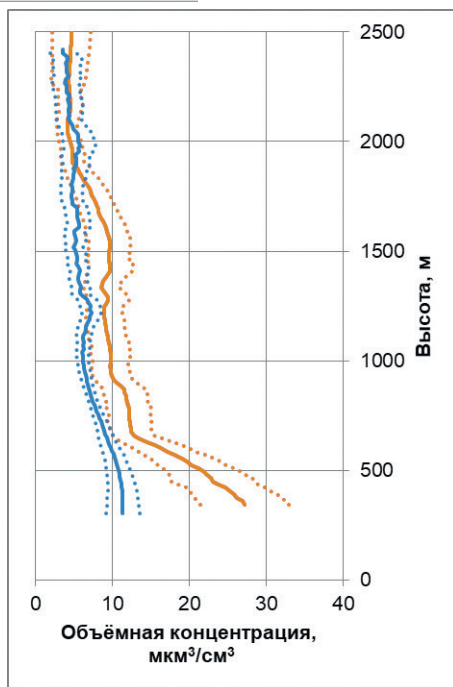


Рис. 3 (начало). Профили микрофизических параметров в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия):
 a) численная концентрация; б) поверхностная концентрация; в) объёмная концентрация.

Fig. 3. Profiles of microphysical parameters in the Vyborgsky district (blue line) and in St. Petersburg (red line):

a) number concentration; b) surface concentration; c) volume concentration.

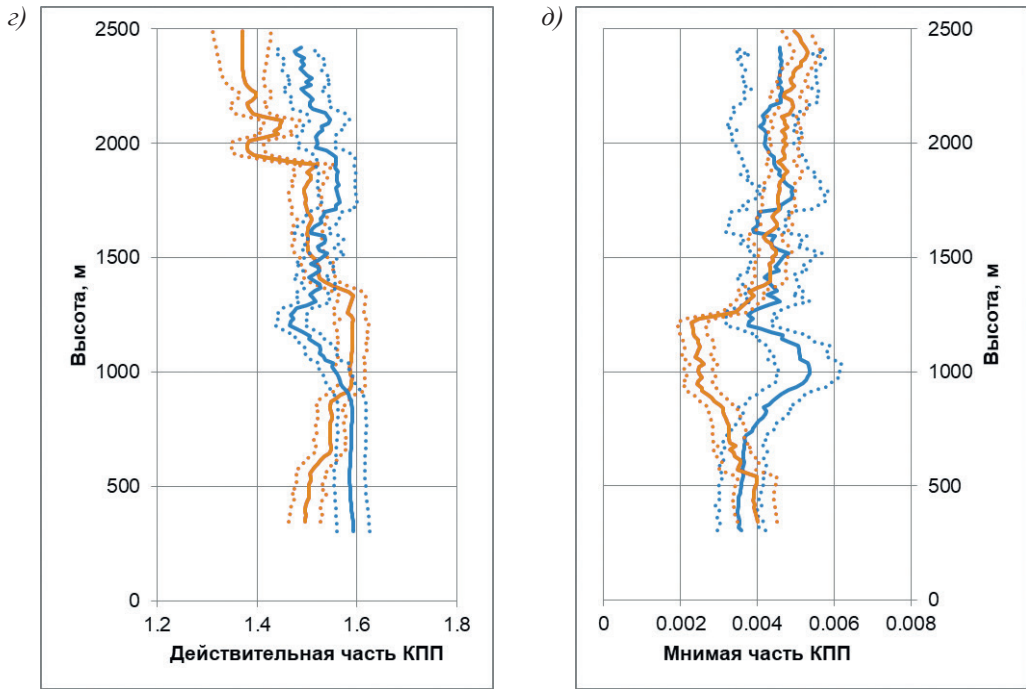


Рис. 3 (окончание). Профили микрофизических параметров в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия):

с) действительная часть КПП; д) мнимая часть КПП.

Fig. 3. Profiles of microphysical parameters in the Vyborgsky district (blue line) and in St. Petersburg (red line):

d) the real part of the complex refractive index; e) the imaginary part of the complex refractive index.

равной 713 ± 283 частиц в см^3 , что вызвано изменением направления ветра на данных высотах. Аэрозольная оптическая толщина для слоя от 300 до 2500 м составила 0,15 и 0,08 для длин волн 355 и 532 нм соответственно. В Санкт-Петербурге максимальная концентрация составила 4657 ± 1045 частиц в см^3 на высоте 350 м, в слое 1300—1900 м со значением 1530 ± 529 на высоте 1560 м. Оптическая толщина в Санкт-Петербурге в слое от 300 до 2500 м составила 0,25 и 0,1 на длинах волн 355 и 532 нм соответственно.

Параметр Ангстрема позволяет сделать вывод о характере распределения частиц по размерам. Значение выше 2 указывает на преобладание мелкодисперсного аэрозоля, тогда как значение ниже 1 говорит о преобладании крупных аэрозольных частиц. В день проведения наблюдений в Выборгском районе параметр Ангстрема в среднем в столбе на всей высоте измерений соответствовал значению $1,44 \pm 0,24$. Это свидетельствует о смешанном распределении аэрозоля с наличием как мелко-, так и крупнодисперсной фракции с долей мелкодисперсного аэрозоля от 30 до 70 процентов. Параметр Ангстрема в день наблюдения в Санкт-Петербурге

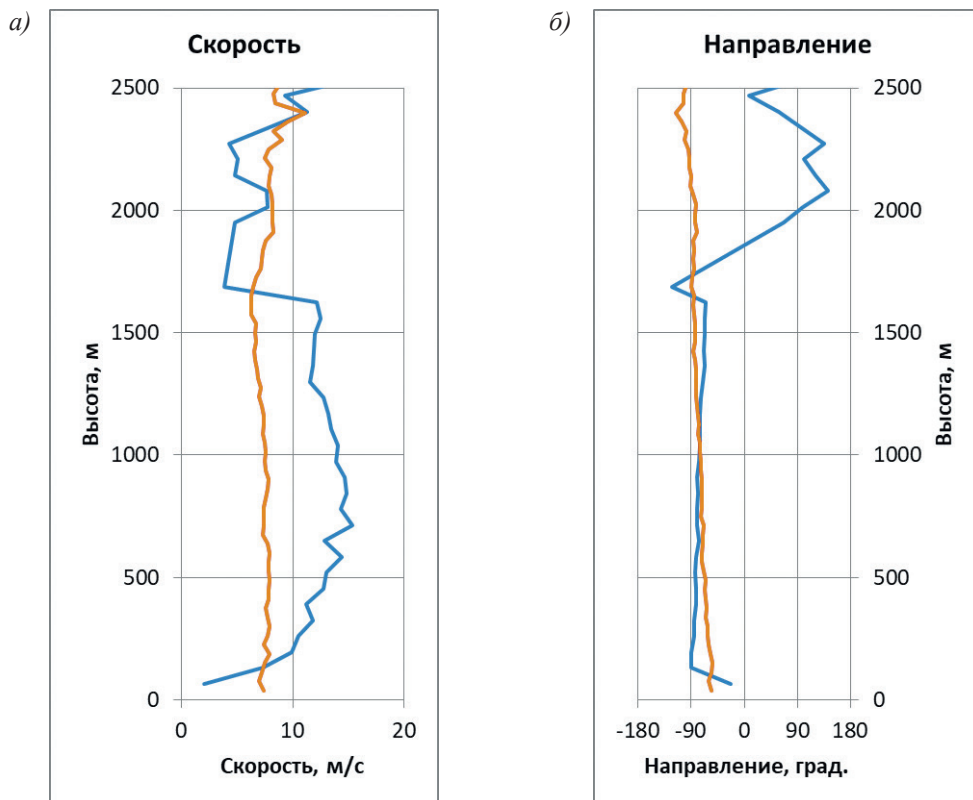


Рис. 4. Профили ветровых характеристик в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия):

a) скорость; *б)* направление (± 180 — южное, -90 — западное, 0 — северное, 90 — восточное).

Fig. 4. Profiles of wind characteristics in the Vyborgsky district (blue line) and in St. Petersburg (red line):

a) speed; *b)* direction (± 180 — south, -90 — west, 0 — north, 90 — east).

составил $1,91 \pm 0,56$ и обусловлен преобладанием мелкодисперсного аэрозоля над мегаполисом.

Параметр Ангстрема (440—870 нм) в Петергофе с 2013 г. по 2016 г., по данным AERONET [33], изменяется по месяцам от 1,0 до 1,6 с максимальными значениями в теплое время года. Осенью в некоторые дни наблюдений он достигает 1,9. Принимая во внимание расстояние между местами наблюдений, возможен дополнительный вклад вторичного мелкодисперсного аэрозоля антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге, что дает более высокие значения параметра Ангстрема.

Действительная и мнимая часть КПП в Выборгском районе находились в пределах $1,47$ — $1,59$ и $0,0035$ — $0,0053$, в Санкт-Петербурге — в пределах $1,37$ — $1,59$

и 0,0023—0,0052. Имеющиеся показатели говорят о присутствии в атмосфере Санкт-Петербурга и Выборгского района индустриального и морского аэрозоля.

Динамика воздушной массы представлена в виде вертикальных профилей скорости и направления ветра на рис. 4.

Направление ветра в дни наблюдений в Санкт-Петербурге и Выборгском районе Ленинградской области было западным (со стороны Финляндии). В Выборгском районе скорость ветра на всех высотах наблюдений не превышала 16 м/с. Во время проведения измерений в Санкт-Петербурге скорость ветра составляла 7—8 м/с.

Выводы

Пространственное распределение аэрозолей в Санкт-Петербурге и Ленинградской области было исследовано на основании полученных оптических данных с применением многоволновых лидарных систем. Проведенные измерения позволили определить различия содержания аэрозольной компоненты в Санкт-Петербурге и Выборгском районе Ленинградской области, оценить долю вторичного аэрозоля в загрязнении атмосферы в мегаполисе. Показано, что численная концентрация частиц по лидарным данным на высоте 350 м в Санкт-Петербурге более чем в 3,5 раза превышает численную концентрацию частиц в Выборгском районе, что, по мнению авторов, связано с долей вторичного аэрозоля антропогенного происхождения. Меньшее содержание аэрозольных частиц в Выборгском районе, как и следовало ожидать, вызвано отсутствием крупных промышленных предприятий вблизи площадки наблюдения, а также западным направлением переноса (со стороны Финляндии вдоль побережья Финского залива), зарегистрированным в дни наблюдений, который препятствовал заносу аэрозолей из г. Санкт-Петербург. Зарегистрированное направление ветра позволило оценить роль мегаполиса в загрязнении атмосферы.

Высота насыщенного аэрозодем слоя в Санкт-Петербурге ограничена высотой 2000 м, в Выборгском районе — 1200 м. Концентрация аэрозолей, зарегистрированная в Выборгском районе, на всей высоте лидарного зондирования до 2000 м значительно ниже, чем в Санкт-Петербурге. Содержание аэрозолей выше 2000 м не имеет значительных различий между Санкт-Петербургом и Выборгским районом. В атмосфере г. Санкт-Петербург аэрозольная компонента представлена более мелкодисперсной фракцией аэрозоля, чем в Выборгском районе. Данный тип аэрозоля несет большую опасность для здоровья населения по сравнению с крупнодисперсной фракцией.

Повышенное содержание аэрозолей над мегаполисом ведет к дополнительной нагрузке на прилегающие к Санкт-Петербургу районы, которая в значительной степени определяется метеорологической обстановкой. Также повышенное содержание аэрозолей ведет к уменьшению прозрачности атмосферы и приводит к пространственной неоднородности поступления УФ радиации в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Ввиду изменчивости пространственного распределения аэрозолей в пограничном слое атмосферы необходимо проведение

непрерывного мониторинга состояния атмосферы с применением лидарных технологий.

В дальнейшем авторами планируется выполнить синхронные измерения мобильным и стационарным лидарными комплексами в Санкт-Петербурге и Ленинградской области при разных направлениях ветра.

Список литературы

1. How air pollution is destroying our health: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (дата обращения: 26.06.2023).
2. Marchwinska-Wyrwal E., Dziubanek G., Hajok I. et al. The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources. Rijeka.: IntechOpen, 2011. DOI: 10.5772/17906.
3. Park M., Joo H. S., Lee K. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. art. 17007. DOI: 10.1038/s41598-018-35398-0.
4. Thangavel P., Park D., Lee Y.-C. Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview // *Int J Environ Res Public Health*. 2022. Vol. 19. No. 12. Iss. 12 P. 22. DOI: 10.3390/ijerph19127511.
5. Шабельник Е. С. Исследование влияния воздушного аэрозоля на состояние и внешний облик зданий и сооружений // *Перспективные технологии в строительстве и техносферной безопасности, ИСОиП ДГТУ в г. Шахты*. 2020. С. 94—101.
6. Берлянд М. Е., Кондратьев К. Я. Города и климат планеты. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 40 с.
7. Боков В. Н., Воробьев В. Н., Сарвинова Е. В. Влияние изменчивости ветра на внутригодовое распределение атмосферных примесей в Санкт-Петербурге // *Ученые записки РГГМУ*. 2006. № 3. С. 95-103.
8. Крюкова С. В., Симакина Т. Е. Оценка влияния метеорологических параметров на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015. № 5—2. С. 299—305.
9. Martins L. D., Hallak R., Alves R. C. et al. Long-range Transport of Aerosols from Biomass Burning over Southeastern South America and their Implications on Air Quality // *Aerosol Air Qual. Res*. 2018. Vol. 8. P. 1734—1745. DOI: 10.4209/aaqr.2017.11.0545.
10. Bagtasa G., Cayetano M. G., Yuan C.-S. et al. Long-range transport of aerosols from East and Southeast Asia to northern Philippines and its direct radiative forcing effect // *Atmospheric Environment*. 2019. Vol. 218. art. 117007. DOI:10.1016/j.atmosenv.2019.117007.
11. Lin C.-Y., Liu S. C., Chou C. C.-K. et al. Long-range transport of aerosols and their impact on the air quality of Taiwan // *Atmospheric Environment*. 2005. Vol. 39. Iss. 33. P. 6066—6076. DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.06.046.
12. Mallone S., Stafoggia M., Faustini A. et al. Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy // *Environmental Health Perspectives*. 2011. Vol. 119. No. 10. P. 1409—1414. DOI: 10.1289/ehp.1003026.
13. Liang Y., Che H., Wang H. et al. Aerosols Direct Radiative Effects Combined Ground-Based Lidar and Sun-Photometer Observations: Cases Comparison between Haze and Dust Events in Beijing // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 2. 18 p. art. 266. DOI: 10.3390/rs14020266.
14. Ma X., Wang C., Han G. et al. Regional Atmospheric Aerosol Pollution Detection Based on LiDAR Remote Sensing // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 20. art. 2339. DOI:10.3390/rs11202339.
15. Liu B., Ma Y., Gong W. et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and Sun Photometer under Different Conditions over Central China // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. art. 10066. DOI: 10.1038/s41598-018-28417-7.
16. Розенберг Г. В. Оптические исследования атмосферного аэрозоля // *Успехи физических наук*. 1968. Т. 95. № 1. С. 159—208.
17. Зуев В. Е., Макиенко Э. В., Наац И. Э. Определение оптических свойств стратосферных аэрозолей наземными лидарами // *Доклады Академии наук*. 1982, Т. 265. № 5. С. 1105—1107.

18. Захаров В. М., Костко О. К., Хмелевцов С. С. Лидары и исследование климата. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 320 с.
19. Иванов А. П., Чайковский А. П., Зеге Э. П. и др. Исследование трансграничного переноса загрязнений в атмосфере в регионе Беларуси // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 12. С. 1048—1058.
20. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
21. Adam M., Nicolae D., Belegante L. et al. Biomass Burning Measurements in Earlinet // EPJ Web Conf. 2020. Vol. 237. art. 05005. DOI: 10.1051/epjconf/202023705005.
22. Adam M., Fragkos K., Solomos S. et al. Methodology for Lidar Monitoring of Biomass Burning Smoke in Connection with the Land Cover // Remote Sensing. 2022 Vol. 14. No. 19. art. 4734. DOI: 10.3390/rs14194734.
23. Mona L., Papagiannopoulos N., Basart S. et al. EARLINET dust observations vs. BSC-DREAM8b modeled profiles: 12-year-long systematic comparison at Potenza, Italy // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. Vol. 14. No. 16. P. 8781—8793. DOI:10.5194/acp-14-8781-2014.
24. Ross J. L., Waggoner A. P., Hobbs P. V., Ferek R. J. Airborne Lidar Measurements of a Smoke Plume Produced by a Controlled Burn of Crude Oil on the Ocean // Journal Air Waste Manag. Assoc. 1996. Vol. 46. No. 4. P. 327—334. DOI: 10.1080/10473289.1996.10467467.
25. Yabuki M., Kuze H., Lagrosas N. et al. Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data // Japanese Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 42. Part 1. No. 2A. art. 296. DOI: 10.1109/CLEOPR.2003.1274753.
26. Saha S., Sharma S., Kumar K. N. et al. A case study on the vertical distribution and characteristics of aerosols using ground-based raman lidar, satellite and model over Western India // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42. Iss. 17. P. 6417—6432. DOI: 10.1080/01431161.2021.1938737.
27. Molero F., Pujadas M., Artiñano B. Study of the Effect of Aerosol Vertical Profile on Microphysical Properties Using GRASP Code with Sun/Sky Photometer and Multiwavelength Lidar Measurements // Remote Sens. 2020. Vol. 12. No. 24. art. 4072. DOI: 10.3390/rs12244072.
28. Osterloh L., Pérez C., Böhme D. et al. Parallel software for retrieval of aerosol distribution from LIDAR data in the framework of EARLINET-ASOS // Computer Physics Communications. 2009. Vol. 180. Iss. 11. P. 2095—2102. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.06.011.
29. Донченко В. К., Самуленков Д. А., Мельникова И. Н. и др. Лазерные системы Ресурсного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 122—132.
30. Klett J. D. Lidar Inversion with Variable Backscatter/Extinction Ratios // Applied Optics. 1985. Vol. 24. Iss. 11. P. 1638—1643. DOI: 10.1364/AO.24.001638.
31. Волков Н. Н. Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчета параметров и анализа данных / Дисс. канд. технических наук. МИИГАиК. М. 2013. 135 с.
32. Veselovskii I., Whiteman D. N., Kolgotin A. et al. Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions // J. of Atmospheric and Oceanic Tech. 2009. Vol. 26. P. 1543—1557.
33. Волкова К. А., Поберовский А. В., Тимофеев Ю. М. и др. Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 6. С. 425—431. DOI: 10.15372/AOO20180601.

References

1. How air pollution is destroying our health. Available at: <https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (accessed on: 26.06.2023).
2. Marchwinska-Wyrwal E., Dziubanek G., Hajok I. et al. *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*. Rijeka.: IntechOpen, 2011: 458 p. DOI: 10.5772/17906.
3. Park M., Joo H. S., Lee K. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources. *Scientific Reports*. 2018; (8):17007. DOI: 10.1038/s41598-018-35398-0.

4. Thangavel P., Park D., Lee Y.-C. Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022; 19(12):22. DOI: 10.3390/ijerph19127511.
5. Shabelnik E. S. Study of the influence of air aerosol on the condition and appearance of buildings and structures. *Perspektivnye tekhnologii v stroitel'stve i tekhnosfernoj bezopasnosti ISOiP DGTU v g. Shahty = Perspective technologies in construction and technospheric safety*. ISOiP DGTU in Shahty. 2020: (94—101). (In Russ.).
6. Berlyand M. E., Kondratiev K. Ya. *Goroda i klimat planet = Cities and climate of the planet*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 40 p. (In Russ.).
7. Bokov V. N., Vorobev V. N., Sarvirova E. V. The influence of wind variability on the intra-annual distribution of atmospheric pollutants in St. Petersburg. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2006; (3):(95—103). (In Russ.).
8. Kryukova S. V., Simakina T.E. Assessment of the influence of meteorological parameters on the concentrations of pollutants in the atmosphere of St. Petersburg. *Aktua'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk = Current problems of the humanities and natural sciences*. 2015; 5(2):(299—305). (In Russ.).
9. Martins L. D., Hallak R., Alves R. C. et al. Long-range Transport of Aerosols from Biomass Burning over Southeastern South America and their Implications on Air Quality. *Aerosol Air Qual. Res.* 2018; (8):1734—1745. DOI: 10.4209/aaqr.2017.11.0545.
10. Bagtasa G., Cayetano M. G., Yuan C.-S. et al. Long-range transport of aerosols from East and Southeast Asia to northern Philippines and its direct radiative forcing effect. *Atmospheric Environment*. 2019; (218):17007. DOI:10.1016/j.atmosenv.2019.117007.
11. Lin C.-Y., Liu S.C., Chou C.C.-K. et al. Long-range transport of aerosols and their impact on the air quality of Taiwan. *Atmospheric Environment*. 2005; 39(33):6066—6076. DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.06.046.
12. Mallone S., Stafoggia M., Faustini A. et al. Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy. *Environmental Health Perspectives*. 2011; 119(10):1409—1414. DOI: 10.1289/ehp.1003026.
13. Liang Y., Che H., Wang H. et al. Aerosols Direct Radiative Effects Combined Ground-Based Lidar and Sun-Photometer Observations: Cases Comparison between Haze and Dust Events in Beijing. *Remote Sensing*. 2022; 14(2):266. DOI: 10.3390/rs14020266.
14. Ma X., Wang C., Han G. et al. Regional Atmospheric Aerosol Pollution Detection Based on LiDAR Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2019; 11(20):2339. DOI:10.3390/rs11202339.
15. Liu B., Ma Y., Gong W. et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and Sun Photometer under Different Conditions over Central China. *Scientific Reports*. 2018; (8):10066. DOI: 10.1038/s41598-018-28417-7.
16. Rosenberg G. V. Optical studies of atmospheric aerosol. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*. 1968; 95(1):(159—208). (In Russ.).
17. Zuev V. E., Makienco E. V., Naats I. E. Determination of the optical properties of stratospheric aerosols by ground-based lidar. *Dokladi akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 1982; 265(5):(1105—1107). (In Russ.).
18. Zakharov V. M., Kostko O. K., Khmelevtsov S.S. *Lidary i issledovanie klimata = Lidars and climate research*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990: 320 p. (In Russ.).
19. Ivanov A. P., Tchaikovsky A. P., Zege E. P. et al. Study of transboundary transport pollution in the atmosphere in the region of Belarus. *Optika atmosfery I okeana = Atmospheric and ocean optics*. 2007; 20(12):(1048—1058). (In Russ.).
20. Zuev V. E., Zuev V. V. *Distancionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery = Remote optical sensing of the atmosphere*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992: 232 p. (In Russ.).
21. Adam M., Nicolae D., Belegante L. et al. Biomass Burning Measurements in Earlinet. *EPJ Web Conf*. 2020; (237):05005. DOI: 10.1051/epjconf/202023705005.
22. Adam M., Fragkos K., Solomos S. et al. Methodology for Lidar Monitoring of Biomass Burning Smoke in Connection with the Land Cover. *Remote Sensing*. 2022; 14(19):4734. DOI: 10.3390/rs14194734.
23. Mona L., Papagiannopoulos N., Basart S. et al. EARLINET dust observations vs. BSC-DREAM8b modeled profiles: 12-year-long systematic comparison at Potenza, Italy. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; 14(16):8781—8793. DOI:10.5194/acp-14-8781-2014.

24. Ross J.L., Waggoner A. P., Hobbs P. V., Ferek R. J. Airborne Lidar Measurements of a Smoke Plume Produced by a Controlled Burn of Crude Oil on the Ocean. *Journal Air Waste Manag. Assoc.* 1996; 46(4):327—334. DOI: 10.1080/10473289.1996.10467467.
25. Yabuki M., Kuze H., Lagrosas N. et al. Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2003; (42):(2A):296. DOI: 10.1109/CLEOPR.2003.1274753.
26. Saha S., Sharma S., Kumar K. N. et al. A case study on the vertical distribution and characteristics of aerosols using ground-based raman lidar, satellite and model over Western India. *International Journal of Remote Sensing.* 2021; 42(17):6417—6432. DOI: 10.1080/01431161.2021.1938737.
27. Molero F., Pujadas M. and Artiñano B. Study of the Effect of Aerosol Vertical Profile on Microphysical Properties Using GRASP Code with Sun/Sky Photometer and Multiwavelength Lidar Measurements. *Remote Sens.* 2020; 12(24):4072. DOI: 10.3390/rs12244072.
28. Osterloh L., Pérez C., Böhme D. et al. Parallel software for retrieval of aerosol distribution from LIDAR data in the framework of EARLINET-ASOS. *Computer Physics Communications.* 2009; 180(11):2095—2102. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.06.011.
29. Donchenko V. K., Samulenkov D. A., Mel'nikova I.N. et al. Laser systems of the Resource Center of St. Petersburg State University. Opportunities, goal setting and first results. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2013; 10(3):(122—132). (In Russ.).
30. Klett J. D. Lidar Inversion with Variable Backscatter/Extinction Ratios. *Applied Optics.* 1985; 24(11):1638—1643. DOI: 10.1364/AO.24.001638.
31. Volkov N. N. Mnogovolnovaya lidarnaya sistema dlya opredeleniya fizicheskikh parametrov troposfernogo aerolya: metodika rascheta parametrov i analiza dannyh. Diss. Kand. tekhnicheskikh nauk. MIIGAiK. M. 2013:135 p. (In Russ.).
32. Veselovskii I., Whiteman D. N., Kolgotin A. et al. Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2009; (26):1543—1557.
33. Volkova K. A., Poberovsky A. V., Timofeev Yu. M. et al. Aerosol Optical Characteristics Retrieved from CIMEL Sun Photometer Measurements (AERONET) near St. Petersburg. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2018; 31(6):(425—431). (In Russ.). DOI: 10.15372/AOO20180601.

Информация об авторах

Дмитрий Альбертович Самуленков, СПбГУ, Научный парк, РЦ «Обсерватория экологической безопасности», директор, e-mail: samulenkov_da@mail.ru.

*Максим Викторович Сапун*ов, СПбГУ, Научный парк, РЦ «Обсерватория экологической безопасности», инженер, e-mail: mikecf@mail.ru.

Information about authors

Dmitrii Albertovich Samulenkov, SPbU, Research Park, Research Center “Environmental Safety Observatory”, director, e-mail: samulenkov_da@mail.ru.

Maksim Viktorovich Sapunov, SPbU, Research Park, Research Center “Environmental Safety Observatory”, engineer, e-mail: mikecf@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 27.06.2023

Принята к печати после доработки 28.10.2023

The article was received on 27.06.2023

The article was accepted after revision on 28.10.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 666—683.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):666—683.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.463.6:551.466.3](261.246)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683

О типичном и аномальном режимах выхолаживания морских вод в прибрежной зоне Куршской косы

Анастасия Евгеньевна Куприянова^{1,2},
*Владимир Алексеевич Гриценко*¹, *Александр Владимирович Килесо*¹,
Ксения Дмитриевна Коробченкова^{1,2}

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

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград,
kupriyanova_ae@mail.ru

Аннотация. Исследование изменчивости температуры для морских прибрежных вод у Куршской косы выполнено на основе данных инструментальных измерений термокосы, метеонаблюдений 2016 г.—2020 г., спутниковых данных и массива реанализа. Для осенне-зимнего периода наблюдений выделены типичный и аномальный режимы выхолаживания воды с поверхности. При типичном режиме выхолаживание до позднесенних температур протекает за 1,5—2 месяца (2017 г.—2020 г.), а при аномальном (2016 г.) — за 7—8 дней. Тренды скорости охлаждения воды при типичном режиме составили $-0,11$ °C/сутки и $-0,22$ °C/сутки — при аномальном. Оценка температурных градиентов на границе вода–воздух показала, что октябрь наиболее благоприятен для развития конвекции ($\Delta\rho_{\max} = 0,035$ кг/м³ в 2016 году). Полуэмпирические оценки числа Релея в октябре 2016 года подтвердили возможность превышения критического значения и возникновения условий для развития конвекции.

Ключевые слова: конвекция, ветро-волновое перемешивание, гидростатическая неустойчивость, юго-восточная Балтика, Куршская коса.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–27–00150, <https://rscf.ru/project/23-27-00150/>. Авторы выражают благодарность ООО «Лукойл–КМН» (г. Калининград) за организацию процессов наблюдения и получения данных (в 2015—2020 гг.), а также АО ИО РАН за возможность работы с данными измерений термокосы.

Для цитирования: Куприянова А. Е., Гриценко В. А., Килесо А. В., Коробченкова К. Д. О типичном и аномальном режимах выхолаживания морских вод в прибрежной зоне Куршской косы // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 666—683. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683.

Original article

About typical and anomalous modes of sea water cooling in a coastal zone of the Curonian spit

Anastasia E. Kupriyanova^{1, 2}, *Vladimir A. Gritsenko*²,
*Alexander V. Kileso*², *Ksenia D. Korobchenkova*^{1, 2}

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

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia, Kaliningrad,

*kupriyanova_ae@mail.ru

Summary. An investigation of the temperature variability of coastal waters in the southeastern part of the Baltic Sea was carried out. Experimental data were collected from measurements of the thermo sensors on the platform D-6 and related meteorological observations for 2016–2020. For the autumn–winter period of observations, typical and anomalous modes of water cooling from the surface were identified. A typical cooling of water was considered to be cooling of water to late autumn temperatures (~5 °C), which lasted for seven to eight weeks. Cooling of the water, which lasted 7–8 days, was considered abnormal. An assessment of temperature gradients in the water–air contact zone showed that October is the most favorable month for the beginning of thermogravitational convection. The maximum density difference (0,035 kg/m³) was observed during the period of anomalous mode of water cooling in mid-October 2016. An analysis of the experimental data showed that the dynamics of water during wind-wave mixing and drift currents did not allow to distinguish the presence of convection. The intensification of thermogravitational convection was manifested in experimental data during storm winds from the coast (the eastern direction, in October 2016). It was noted that the presence of a temperature gradient between the water sensors at 1 and 3 meters is only a necessary condition for the beginning of thermogravitational convection. In particular, in January 2016, the value of the temperature gradient between the horizons reached –0,57 °C/m, while the air temperature at the time of measurements was 1,76 °C, and the water temperature was 2,07 °C and 2,64 °C at 1 and 3 meters, respectively. Thus, the water at the 1-meter horizon turned out to be colder, but had a lower density than the underlying layer at the 3-meter horizon, and there were no conditions for the appearance of convection in the 1–3 meter layer. Semi-empirical estimates of the Rayleigh number during anomalous cooling of water in 2016 (with water–air temperature difference from 2 °C to 10 °C and the thickness of the boundary thermal layer about 0,5 cm) confirmed the possibility of exceeding the critical value and the occurrence of conditions for the beginning of thermogravitational convection.

Keywords: convection, wind–wave mixing, hydrostatic instability, southeastern Baltic Sea, Curonian Spit.

Acknowledgments: The investigations are supported by Russian Science Foundation via grant number 23–27–00150, [https://rscf.ru/en/project/23–27–00150/](https://rscf.ru/en/project/23-27-00150/). The authors are grateful to LLC «Lukoil–KMN» (Kaliningrad) for organization of data acquisition process (2015–2020), as well as to AB IO RAS for the opportunity to work with the measurement data of the thermocouple.

For citation: Kupriyanova A. E., Gritsenko V. A., Kileso A. V., Korobchenkova K. D. About typical and anomalous modes of sea water cooling in a coastal zone of the Curonian spit. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):666–683. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683.

Введение

Общий характер изменчивости термической структуры вод Балтийского моря известен по результатам многих работ [1–6]. Верхний 50–60 м слой моря

формируется под воздействием речного стока и осадков, что определяет его низкую соленость (6—8 psu). Ветро-волновое перемешивание и конвективные процессы в период осенне-зимнего выхолаживания обеспечивают квазиоднородность верхнего слоя вплоть до галоклина. Свойства нижнего слоя вод моря (соленость, температура, содержание кислорода) определяются, в основном, затоками вод Северного моря [7]. Между ними определенное положение занимает холодный промежуточный слой, природа которого, предположительно, определяется термогравитационной конвекцией [8].

Оперативные STD-измерения в прибрежной зоне Балтийского моря [3], по данным судовых разрезов 2004 г.—2006 г., показали существенную пространственно-временную изменчивость температуры воды. В частности, в марте 2006 года наблюдалась очень холодная вода, вызванная воздействием сильных штормов и конвекции. В марте всех годов была отмечена значительная горизонтальная стратификация вод: вблизи берега вода была холоднее на 0,5 градуса, чем в 15—20 км от берега. Этот же факт отмечался и в других работах [1, 8]. Зимой за счет совместного действия ветрового перемешивания и конвекции глубина перемешанного слоя по данным измерений достигала 50 м. К сожалению, разделить степень влияния ветро-волнового воздействия и конвекции на базе имеющихся измерений не представилось возможным.

Изменчивость вертикального распределения температуры воды на балтийском мелководье с 2015 года подробно по времени (дискретность — 1 минута) фиксируется датчиками термоксы в районе нефтедобывающей платформы Д-6. Анализ полученных данных за 2015 год [9] позволил обнаружить несколько событий апвеллинга и периодов конвективного перемешивания. В отдельные периоды осени и весны был зафиксирован суточный ход температуры на глубине в 1 метр с амплитудой в 1 °С.

Таким образом, длительные по времени инструментальные измерения на платформе Д-6 говорят о наличии различных по своей природе особенностей изменчивости температуры морских вод. Анализ накопленного массива данных может помочь выделить промежуточные фазы и обуславливающие их факторы для известного в целом процесса осенне-зимнего выхолаживания вод юго-восточной Балтики [1—4].

Кроме того, интенсивное выхолаживание приурезовых вод может порождать импульсные вдольсклоновые потоки холодной воды [8, 10], способные подпитывать холодный промежуточный слой Балтийского моря. Оценки возможности возникновения такого рода ситуаций помогут дополнить понимание природы квазистационарного существования этого слоя.

Целью данной работы является исследование деталей процесса выхолаживания прибрежных вод у Куршской косы по данным измерений датчиков термоксы, спутниковым данным, данным реанализа и сопутствующих метеонаблюдений в осенний период.

Материалы и методы

В качестве основного массива экспериментальных данных были использованы результаты измерений температуры воздуха на высоте 1 метр от поверхности

моря [11] и температуры воды (с погрешностью $\pm 0,025$ °С) на глубинах от поверхности до дна за период с 2015 г. по 2020 г. с дискретностью измерений в 1 минуту. Источником данных послужили датчики температуры термокосы с неравномерным шагом на глубинах 1—28 метров (общее количество горизонтов — 15), установленной на переходном мостике между двумя модулями нефтяной платформы Д-6 (юго-восточная часть Балтийского моря, 22,5 км от берега) в тридцати метрах от опор каждой из них [9].

Расчет значений плотности воды проводился с использованием международного термодинамического уравнения состояния морской воды (TEOS-10). Количественные показатели были получены при помощи модуля GSW для языка программирования Python, функция “`gsw.density.rho_t_exact(SA, t, p)`”, где SA — абсолютная соленость (г/кг), t — температура воды in-situ (°С), p — давление (дбар) [12]. Поскольку в составе термокосы отсутствовали датчики электропроводности, то при расчете плотности использовалось характерное для данного района значение солености равно 7,4 psu [13]. Давление для измерений на горизонтах 1 и 3 метра задавалось равным 1 и 3 дбар соответственно. При возникновении сильного волнения ближайšie к поверхности датчики периодически находились на воздухе, соответствующие этим периодам показания были отфильтрованы по резкому увеличению дисперсии значений температуры.

Кроме того, в работе были использованы ежесуточные спутниковые данные измерений температуры поверхности моря уровня L3 программы Metop-A [14] за осенний период 2016 года. Пространственное разрешение данных по широте и долготе составляет 0,02 градуса. Рассматривались только данные высокого качества (QL = 5). Так как исследуемый район характеризуется большим количеством облачных дней в осенне-зимний период, для дополнения отсутствующих из-за облачности спутниковых данных использованы данные реанализа NOAA OI SST V2 [15]. Это позволило восстановить непрерывность в представлении о фоновых значениях температуры для прибрежной зоны моря. Пространственное разрешение данных по широте и долготе составляет 0,25 градусов.

Все описываемые в работе результаты были получены путем сравнительного анализа данных прямых инструментальных измерений температуры воды и воздуха в окрестности платформы Д-6, метеостанции в городе Пионерский (Калининградская область), спутниковых данных и массивов реанализа.

Результаты

1. Анализ натурных данных.

Измерения температуры морской воды в 2016 г.—2020 г. показали, что постепенное выхолаживание всего столба воды в окрестности термокосы начинается со второй половины сентября, когда дневные температуры воздуха в большинстве случаев не превышают значений температуры воды. Анализ помесечно сгруппированных измеренных показателей температуры с 2016 г. по 2020 г. позволил выделить типичный (2017 г.—2020 г.) и аномальный (2016 г.) режимы процесса выхолаживания.

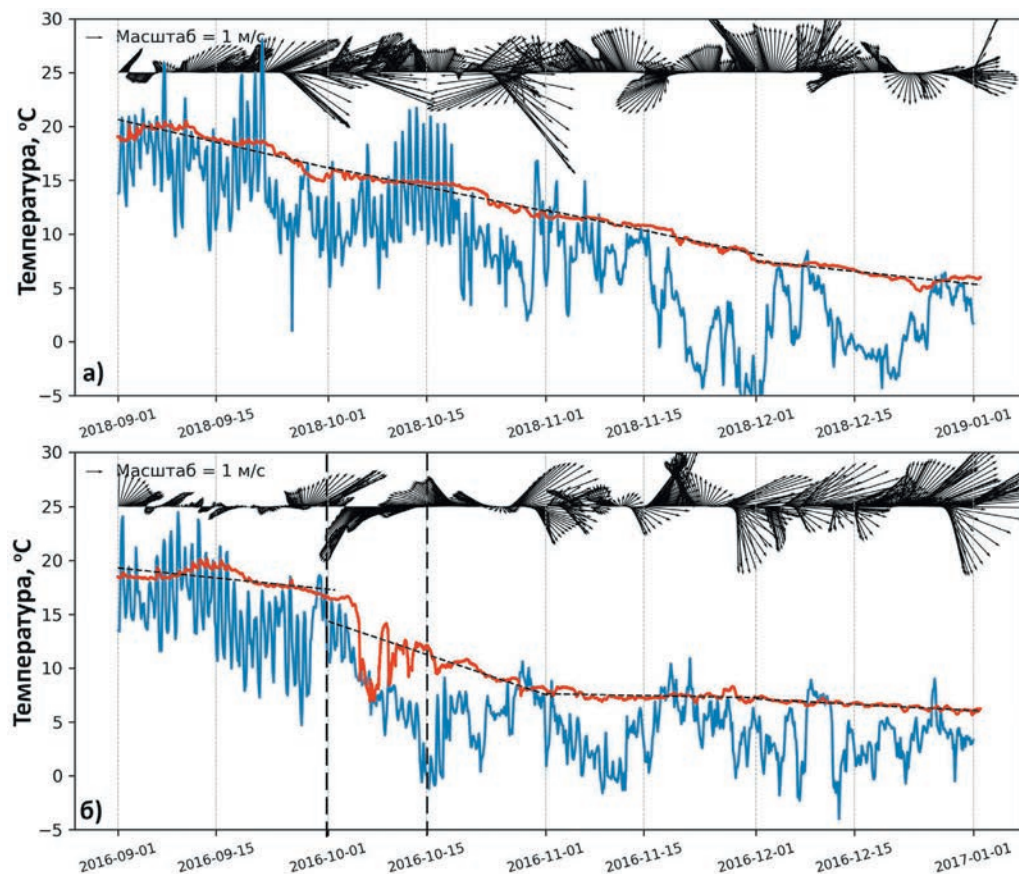


Рис. 1. Изменчивость температуры воздуха (синий цвет), воды (красный цвет), силы и направления ветра для типичного (2018, *a*) и аномального (2016, *b*) режимов выхолаживания приповерхностного слоя прибрежных вод юго-восточной Балтики. Приведены линии месячных трендов (пунктирные линии) в изменчивости температуры воды для периодов с сентября по январь. Период аномального выхолаживания для октября 2016 года (*b*) выделен пунктирными вертикальными линиями.

Fig. 1. Variability of air temperature (blue), water temperature (red), wind strength and direction for typical (2018, *a*) and anomalous (2016, *b*) regimes of the process of cooling the near-surface layer of coastal waters of the SE Baltic. The dotted line indicates trends in water temperature. Also, monthly trends for water temperature variability are plotted on top: for October, a period of intense cooling is highlighted (dotted vertical lines).

На рис. 1 приведены примеры изменчивости температуры воды на глубине 1 м для типичного (на примере 2018 г.) и аномального (2016 г.) процессов осеннего выхолаживания.

Отметим, что для всех лет наблюдений, кроме 2016 г., процесс выхолаживания прибрежных вод происходил примерно с одинаковой скоростью, без резких

скачков, что объясняется совместным действием медленно меняющихся параметров охлаждения поверхностного слоя воды: температуры воздуха, ветрового перемешивания и дрейфовых течений. В частности, в октябре 2018 г. (рис. 1, а) было зафиксировано постепенное падение температуры воздуха с 16 °С в начале месяца до 5 °С к его концу, что привело к уменьшению температуры воды с 16,5 °С до 8 °С. Возникшие в октябре 2018 года метеоусловия способствовали охлаждению всей толщи воды с квазипостоянной скоростью по времени, что и наблюдалось по данным измерений термокосы. В ноябре процесс выхолаживания стабилизируется, достигая температуры воды примерно 5 °С. Во все годы наблюдений (2017 г.—2020 г.) типичный режим перехода к этой температуре занимал 7—8 недель.

В начале октября 2016 г. процесс выхолаживания прибрежных вод произошел скачкообразно. На протяжении всего 1 недели (см. рис. 1 б, 2 б) на фоне максимальных изменений температуры воздуха с 20 °С до –2 °С и воды с 17 °С до 6 °С (рис. 3) произошел быстрый переход от ранне-осеннего (16 °С—17 °С) к поздне-осеннему показателю температуры (5 °С). Зафиксированный в измерениях быстрый переход (рис. 2, б) произошел в условиях воздействия штормового ветра (до 15 м/с) восточного направления с температурой воздуха до –2 °С. За данный период времени весь столб воды охладился до типичного для поздней осени значения 5 °С. В дальнейшем температура прибрежных вод в 2016 г. начала меняться уже только в январе при наступлении зимнего периода с отрицательными температурами воздуха.

Детальный анализ значений температуры для горизонтов 1 и 3 м показал, что на фоне значительного перепада температуры в 11 °С между воздухом и поверхностным слоем воды максимальный перепад температуры между горизонтами воды составил 0,37 °С. Температура воздуха на данный момент времени (15.10.2016 20:03) составила 4,24 °С, а температура воды на горизонте 1 м составляла 10,78 °С, на 3 м — 11,15 °С. Разница плотности между горизонтами равна 0,035 кг/м³.

Отметим, что близкое по смыслу штормовое воздействие на прибрежные воды произошло в 2018 г. Однако оно не привело к аналогичному, как в 2016 г., скачкообразному изменению температуры прибрежных вод. Анализ произошедшей ситуации показал, что решающую роль сыграло направление ветра. При примерно одинаковых значениях скорости ветра и продолжительности штормового воздействия интенсивное выхолаживание в 2016 г. произошло при ветрах восточных румбов с ориентацией от берега (рис. 1, б), а в 2018 г. направление ветра (рис. 1, а) было преимущественно с моря (северо-западных румбов). Оказалось, что интенсификация выхолаживания воды при ветре с открытого моря не отмечалась и в другие годы наблюдений. Таким образом, можно предположить, что ветер восточных румбов и адвективный характер движения воды от берега, которая всегда более холодная в осенне-зимний период [16—18], способствуют скачкообразному выхолаживанию всего столба воды в окрестности точки наблюдения.

Отметим, что наличие градиента температуры между слоями в 1 и 3 м является только необходимым условием для возможности развития термогравитационной

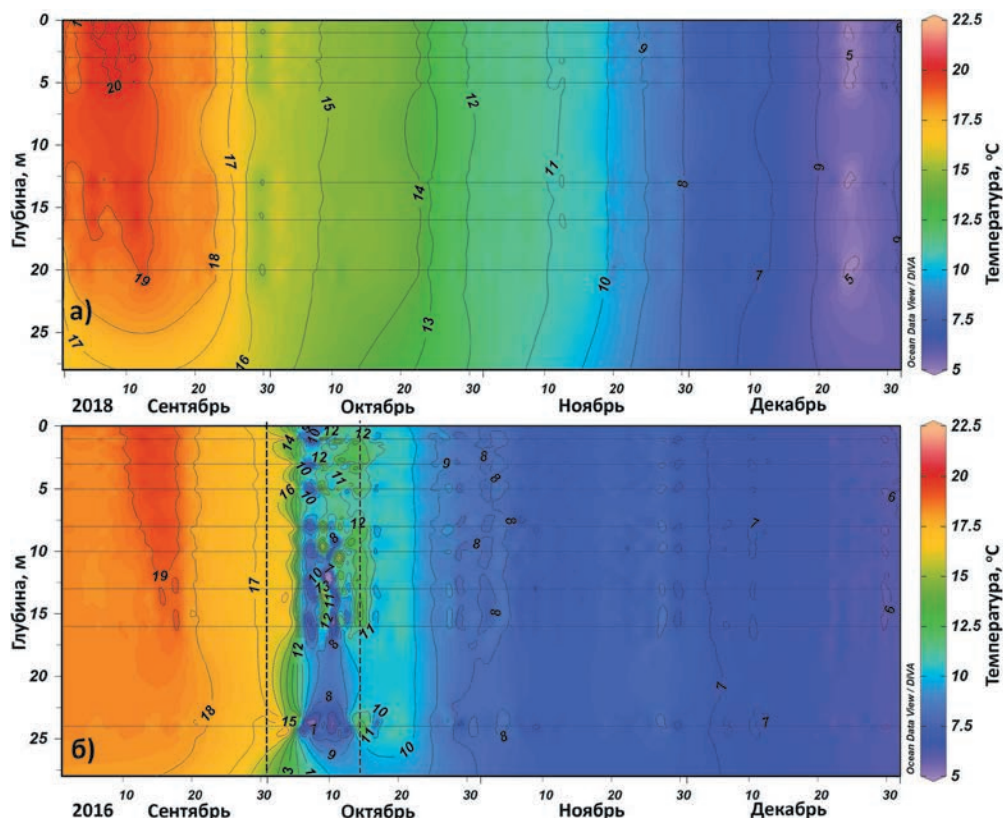


Рис. 2. Общий вид процесса выхолаживания воды от поверхности до дна в сентябре–декабре для типичного (2018 г., даты октября) и аномального (2016 г.): вертикальная ось — глубина, горизонтальная ось — дни (время), горизонтальные черные линии — горизонты с датчиками (1, 3, 5, 8, ..., 28), цветовая шкала — температура (5 °С, ..., 22,5 °С). Период аномального выхолаживания для октября 2016 г. (б) выделен пунктирными вертикальными линиями.

Fig. 2. General view of the water-cooling process from the surface to the bottom in September–December for typical (2018, October dates) and anomalous (2016) conditions. Characteristics: vertical axis — depth, horizontal axis — days (time), horizontal black lines — horizons with sensors (1, 3, 5, 8, ..., 28), color scale — temperature (5 °С, ..., 22,5 °С). For October, a period of intense cooling is highlighted (dotted vertical lines).

конвекции [10, 19–22]. В частности, в январе 2016 г. значение градиента температуры между горизонтами достигало значения $-0,57$ °С/м, при этом температура воздуха на момент измерений (20.01.2016 6:48) составила $-1,76$ °С, температура воды — $2,07$ °С и $2,64$ °С на горизонтах 1 и 3 м соответственно. При этом среднее значение перепада температур в период с 19 по 20 января составило $-0,15$ °С/м. Перепад значений между температурой воздуха и воды на горизонте 1 м равнялся $-4,1$ °С, при максимуме $-5,35$ °С.

Данный период характеризовался изменчивостью температуры воды для горизонта 1 м в диапазоне от 2,04 °С до 2,73 °С (рис. 2). Расчет плотности воды (TEOS–10, 7,4 psu) показал, что в январе максимальный перепад плотности составил –0,001 кг/м³. Таким образом, вода на горизонте 1 м хоть и оказалась холоднее, но имела меньшую плотность, чем у подстилающего слоя на горизонте 3 м, и условий для возникновения конвекции в слое 1–3 м не возникало.

Использование измеренных значений температуры воды на всех горизонтах наблюдений от поверхности до дна (1–28 м) позволило представить развертку во времени процесса охлаждения всего слоя воды в окрестностях точки наблюдения. Как и для описанного выше процесса выхолаживания приповерхностного слоя, типичным для района измерений в 2017 г.—2020 г. оказалось равномерное, квазилинейное по времени понижение температуры от близких к летним значениям в середине сентября (16 °С—18 °С) до характерных для позднесеннего периода (5 °С) (см. рис. 2 б).

Расчет трендов изменчивости температуры прибрежных вод показал (табл. 1), что скорость выхолаживания для типичных годов составляет примерно –0,11 °С/сутки, а максимальная скорость наблюдалась в октябре 2016 г. и составила –0,22 °С/сутки. Близкая к ноябрю 2016 г. скорость выхолаживания (–0,2 °С/сутки) была зафиксирована и в сентябре 2019 г.

Таблица 1

Скорости выхолаживания (°С/сутки) поверхностного слоя воды в осенне-зимний период наблюдений с 2016 г. по 2020 г. в окрестности платформы Д–6

Cooling rates of the surface water layer (°C / day) for the autumn-winter period of observation from 2016 to 2020 in the proximity of the D–6 platform

	Скорость выхолаживания (°С/сутки)				
	2016	2017	2018	2019	2020
Сентябрь	–0,07	–0,10	–0,15	–0,20	–0,06
Октябрь	–0,22	–0,13	–0,13	–0,06	–0,14
Ноябрь	–0,01	–0,09	–0,14	–0,14	–0,09
Декабрь	–0,03	–0,08	–0,07	–0,07	—

В данном случае к быстрому падению температуры поверхностных вод привело совместное влияние сильных ветров западных румбов и низких ночных температур воздуха (до 4 °С) на фоне позднелетних температур воды (более 20 °С). В свою очередь, небольшие скорости выхолаживания в октябре 2019 г. определяются отсутствием сильных ветров во второй половине месяца и температурой воздуха (до 20 °С), превышающей температуру воды (среднее значение составило 15 °С) примерно на 5 °С.

Выполненная оценка перепадов температуры между приповерхностным слоем воздуха и слоем воды на горизонте 1 м в точке наблюдения показала (рис. 3), что максимальные перепады температуры наблюдаются в октябре (~10 °С) и ноябре (~11 °С), однако четкой зависимости между скоростью выхолаживания воды и рассчитанными перепадами температуры выявить не удалось.

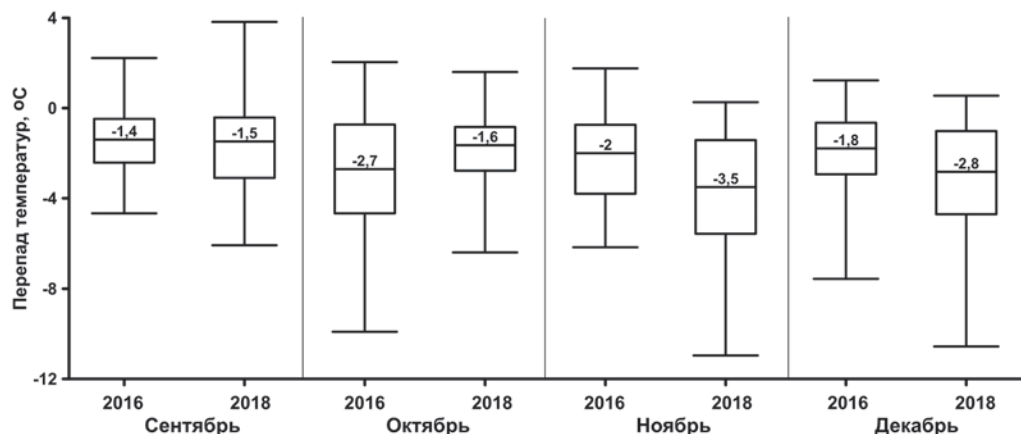


Рис. 3. Квантильный анализ перепада температуры в контактной зоне воздух–вода в 2016 г. и 2018 г. (отдельно по месяцам). Разница между приповерхностным слоем воздуха в точке размещения термокосы и слоем воды на горизонте 1 м. Верхние и нижние концы усов соответствуют максимальным и минимальным значениям, а значения медианы приведены внутри ящика.

Fig. 3. Calculations of temperature differences in the air–water contact zone for 2016 and 2018 (separately by months). The difference between the near–surface layer of air installed at the point of placement of the thermocouple and the layer of water on the horizon is 1 meter. The upper and lower limits correspond to the maximum and minimum values, respectively.

Отсутствие зависимости между скоростью выхолаживания и разницей температуры воздух–вода также не удалось зарегистрировать в сентябре и ноябре 2018 г. Максимальные перепады температуры в ноябре составили примерно 11 °С, что значительно превысило перепады в сентябре, составляющие примерно 6 °С. Однако скорости выхолаживания в обозначенные периоды наблюдений практически одинаковые: $-0,15$ °С/сутки и $-0,14$ °С/сутки для сентября и ноября 2018 г. соответственно.

Анализ рассчитанных значений плотности воды на горизонтах 1 и 3 м, ежемесячно сгруппированных для всего периода наблюдений (2016 г.—2020 г.), показал (рис. 4), что наибольшее число ситуаций с гидростатически неустойчивым распределением плотности в слое воды между этими горизонтами приходилось на конец сентября и октябрь и, в основном, приурочено к условиям сильных ветров. Максимальные значения перепада плотности (до $0,035$ кг/м³) были зафиксированы в октябре всего периода наблюдений, что позволяет предполагать, что именно в этот период будут возникать благоприятные условия для развития термогравитационной конвекции. В декабре такого рода ситуации наблюдаются значительно реже, так как к этому моменту времени вода уже успевает охладиться до температур ниже 7—8 °С. Дальнейшее уменьшение температуры воды происходит не так интенсивно, о чем свидетельствуют рассчитанные скорости выхолаживания, которые для декабря составляют в среднем $-0,07$ °С/сутки.

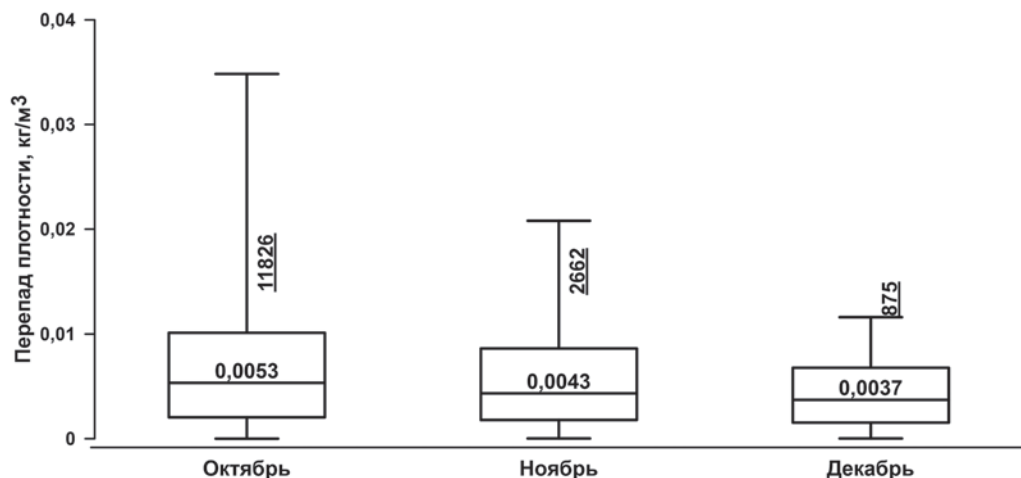


Рис. 4. Квантильный анализ сгруппированных по месяцам положительных перепадов плотности между горизонтами 1 и 3 м для периода с 2016 г. по 2020 г. Над ящиками приведены количество значений соответствующей выборки. Верхние и нижние концы усов соответствуют максимальным и минимальным значениям, а значения медианы приведены внутри ящика.

Fig. 4. Quartile analysis of month-grouped positive density changes between 1 and 3 meter horizons for the period from 2016—2020. Above the boxes are the number of values of the corresponding sample. The top and bottom ends of the whiskers correspond to the maximum and minimum values, and the median values are given inside the box.

2. Полуэмпирическая оценка гидростатической неустойчивости поверхностного слоя.

Рассмотрим возможность возникновения и развития термогравитационной конвекции, отталкиваясь от количественных оценок значений числа Релея (Ra). Как известно [20, 22—25], необходимым условием возникновения термогравитационной конвекции является наличие отрицательного градиента плотности между поверхностным и подповерхностным слоями воды, создающего условия для образования гидростатической неустойчивости в этом слое. Критерием возникновения приповерхностной конвекции принято считать превышение величины числа Рэлея его критического значения [26]:

$$Ra_{кр} = \frac{g\alpha\Delta T\delta^3}{\nu k_T},$$

где g — ускорение свободного падения, α — коэффициент температурного расширения жидкости, ΔT — перепад температуры между воздухом и водой, δ — расстояние между границами слоя, ν — кинематическая вязкость жидкости, k_T — коэффициент температуропроводности жидкости [27]. К сожалению, прямое вычисление значений Ra затруднительно, так как толщина термического пограничного слоя δ плохо поддается определению. Данные с платформы Д-6 имеют недостаточное

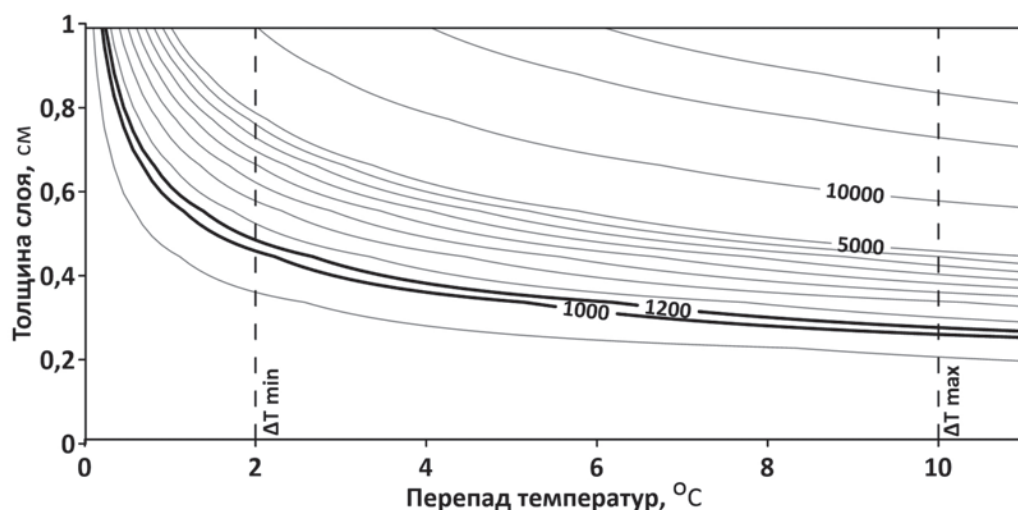


Рис. 5. ΔT - δ -диаграмма зависимости значений числа Релея (Ra) от величины перепада температуры воздух–вода ΔT и толщины термического пограничного слоя δ , диапазоны изменчивости которых взяты из экспериментальных наблюдений различных авторов.

Изолинии от 500 до 5000 с шагом 500, а затем с шагом 10000. Жирными линиями выделена граница критических значений.

Fig. 5. Diagram of the dependence of the values of the Rayleigh number (Ra) on the values of the temperature difference ΔT and the thickness of the thermal boundary layer δ , the variability ranges of which are taken from the experimental observations of various authors. Isolines from 500 to 5000 in increments of 500, then in increments of 10000. Bold lines mark the boundary of critical values.

вертикальное разрешение, поэтому не позволили выполнить оценку толщины слоя. Однако из ранее выполненных инструментальных измерений известно [20, 22—24, 26, 28—32], что оценки толщины слоя δ и градиента температуры ΔT противоречивы и находятся в диапазоне от первых миллиметров до первых сантиметров. Исходя из зависимости числа Рэлея от конкретных значений перепада температуры ΔT и толщины термического пограничного слоя δ и принимая во внимание эмпирически определенные диапазоны изменчивости этих параметров, была построена ΔT - δ -диаграмма зависимости значений числа $Ra = Ra(\Delta T, \delta)$ (рис. 5).

Критическое число Рэлея зависит от типа решаемой задачи и может изменяться от $Ra_{кр}^* = 1024$ в поверхностном слое воды [26] до $Ra_{кр}^* = 1190$ при развитой конвекции для двух пограничных слоев, и $Ra_{кр}^* = 1108$ для жидкости между твердой и жидкой границами [33]. Построенное распределение изолиний Ra показывает, что при реально зафиксированных перепадах температуры ($\min = 2$ °C, $\max = 10$ °C) в октябре 2016 г. и толщине δ пограничного термического слоя больше, чем 0,3 см, величина числа Ra превышает критическое (см. рис. 5). Таким образом, выполненный анализ значений критического числа Рэлея подтвердил возможность развития конвективных движений в приповерхностном слое моря.

Дискуссия

Вышеприведенные оценки и заключения могут быть отнесены лишь к некоторой окрестности морских вод в точке наблюдений (Д–6) за температурой воды. Однако оценки авторов за период с 05.08.2015 г. по 25.05.2016 г. показали [34], что степень корреляции спутниковых данных и измерений термокосы для поверхностного слоя достигала 0,95. Сравнение было выполнено для спутниковых данных [14] программы Метоп–А и температуры воды на горизонте измерений термокосы в 1 метр в диапазоне температур от $-1,5$ до $2,7$ °С. При этом систематическая ошибка показаний данных составила $0,25$ °С для летнего периода и менее $0,1$ °С для осенне-зимнего (спутниковые данные завышали значения температуры поверхности моря).

Для осени 2016 г. спутниковые данные показали (рис. 6) высокую степень горизонтальной однородности температуры приповерхностного слоя прибрежных

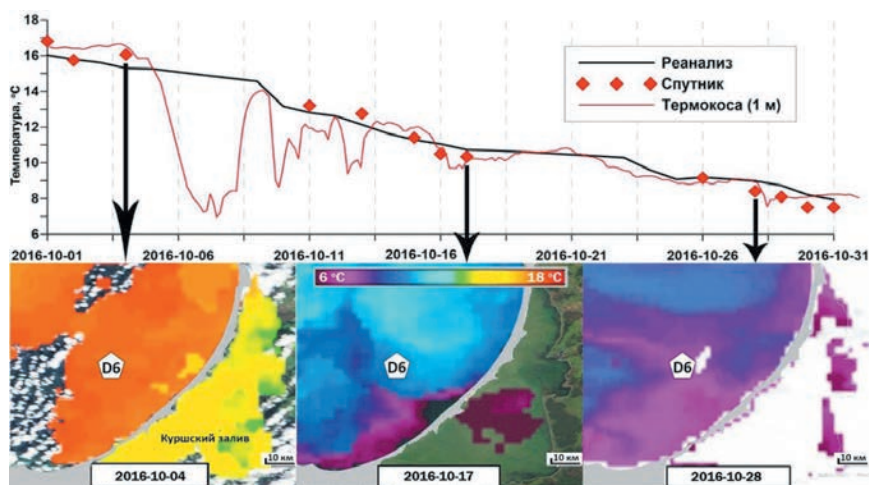


Рис. 6. График изменчивости температуры воды для района Балтийского моря вблизи Куршской косы (верхняя часть рисунка): черная толстая линия — данные реанализа, красные ромбы — спутниковые данные, тонкая красная линия — измерения термокосы на горизонте 1 м. Ниже расположены спутниковые снимки для наблюдаемой части Балтийского моря: слева — начало штормовой ситуации (04.10.2016 г.), по центру — снимок сразу после шторма (17.10.2016 г.), справа — снимок через несколько дней после шторма (28.10.2016 г.). В правом нижнем углу спутниковых снимков расположен Куршский залив (линейный масштаб 10 км).

Fig. 6. Graph of water temperature variability for the part of the Baltic Sea near the Curonian Spit is placed in the upper part of the figure: thick black line — reanalysis data, red diamonds — satellite data, thin red line — thermocouple measurements (1 meter). Below are satellite images for the observed part of the Baltic Sea: on the left — the beginning of the storm situation (10/04/2016), in the center — a picture immediately after the storm (10/17/2016), on the right — a picture a few days after the storm (10/28/2016). In the lower right corner of satellite images is the Curonian Lagoon and linear scale (10 km).

вод Балтики вдоль Куршской косы на начало и после окончания сильного шторма в октябре. Сильная облачность не позволила получить спутниковые данные о промежуточных стадиях аномального выхолаживания вод в октябре 2016 г. Для уточнения ситуации были использованы данные реанализа NOAA OI SST V2 [15], которые также показали высокую горизонтальную однородность температуры приповерхностных вод для всех акваторий, прилегающих к Куршской косе.

График изменчивости температуры для прибрежных вод у Куршской косы на период штормовых событий приведен на рис. 6. Показания термокосы (на горизонте 1 м) хорошо коррелируют с имеющейся изменчивостью температуры поверхности воды по показаниям спутниковых данных. Значения поверхностной температуры реанализа демонстрируют большую инерционность расчетных полей на текущие события из-за больших размеров ячейки ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) расчетной сетки: отклик на аномальное выхолаживание запаздывает на несколько дней (изменения отчетливо видны на графике). Данные реанализа показывают сглаженную картину изменчивости поверхностной температуры морских вод. Через неделю после окончания штормовых событий (28.10.2016 г.) спутник фиксирует позднеосенние показатели ($\sim 5^\circ\text{C}$) температуры морских вод на протяжении всей Куршской косы. Заметим [35—36], что рельеф подводного берегового склона горизонтально однороден почти вдоль всей Куршской косы за исключением небольшого участка у пос. Рыбачий.

Таким образом, приведенные соображения позволяют предполагать, что полученные нами результаты и оценки на основе анализа показаний датчиков термокосы за продолжительный период времени вполне могут быть применимы для морских акваторий, прилегающих к Куршской косе.

Выполненное исследование изменчивости поля температуры прибрежных вод также показало, что для лучшего понимания взаимоотношений основных факторов процесса выхолаживания (ветро-волнового волнения, дрейфовых течений и приповерхностной конвекции) необходимо более детальное измерение всех термодинамических параметров морских вод.

Выводы

Анализ временных рядов датчиков термокосы на горизонтах 1 и 3 м и температуры воздуха на горизонте 1 м над водой показал, что максимальное значение перепада температуры на границе раздела вода–воздух может достигать 11°C . При этом перепад температуры между горизонтами 1—3 м воды составлял $-0,37^\circ\text{C}$. При температуре воздуха $4,24^\circ\text{C}$ температуры воды на горизонтах 1 и 3 метра составляли соответственно $10,75$ и $11,15^\circ\text{C}$, что порождало отрицательный перепад плотности $0,035\text{ кг/м}^3$. Максимальные отрицательные градиенты в контактной зоне вода–воздух зафиксированы в конце сентября–октябре и приурочены к сочетанию холодного воздуха и сильного ветра.

Анализ измеренных значений температуры воды и воздуха за 2016 г.—2020 г. показал, что характер изменчивости во времени процесса выхолаживания прибрежных вод может быть подразделен на типичный и аномальный.

При типичном режиме выхолаживания до позднесенних температур протекает за период в 1,5—2 месяца (в 2018 г. за 7 недель), а при аномальном (в 2016 г.) выхолаживание произошло всего за 7—8 дней. Тренды скорости охлаждения воды с поверхности при типичном режиме составили $-0,11$ °C/сутки и $-0,22$ °C/сутки — при аномальном. Зависимость скорости выхолаживания приповерхностных вод от величины перепада температуры на границе раздела воздух–вода не выявлена.

В аномальном случае холодный и сильный ветер с берега создал условия для интенсивного развития конвекции, что привело к формированию гидростатически неустойчивого распределения плотности в окрестностях точки наблюдения, зафиксированного в измерениях термокосы. Анализ значений чисел Рэлея для 2016 г. подтвердил превышение критического значения и возникновение условий для развития термогравитационной конвекции. Экспериментально зафиксирована зависимость возникновения аномального режима выхолаживания от направления ветра: в штормовых событиях 2016 года ветер дул с берега, а в 2018 году (при близких параметрах шторма) при направлении ветра с моря интенсивное выхолаживание не возникло. Одним из результатов работы стало описание региональных особенностей сезонного выхолаживания морских вод у берегов Куршской косы.

Список литературы

1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Вып. I. Гидрометеорологические условия / Под ред. Терзиева Ф. С. и др. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 449 с.
3. Морозов Е. Г., Шука С. А., Голенко Н. Н. и др. Структура температуры в прибрежной зоне Балтийского моря // Доклады Академии наук. 2007. Т. 416. № 1. С. 115—118.
4. Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно–временных масштабов / Под ред. Е. А. Захарчука / СПб: Гидрометеоздат, 2007. 354 с.
5. Двоглазова Н. В., Чубаренко Б. В. О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 407—421. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.
6. Гмыря Е. И., Чубаренко Б. В. Количественная оценка величины расходов в реках Нижняя Преголя и Дейма (юго-восточная Балтика) по данным измерения придонных течений // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 38—53. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53.
7. Matthaeus W., Frank H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis // Cont. Shelf Res. 1992. Vol. 12. P. 1375—1400.
8. Степанова Н. Б., Чубаренко И. П., Шука С. А. Структура и эволюция холодного промежуточного слоя в юго–восточной части Балтийского моря по данным натурных измерений в 2004—2008 гг. // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 32—43. doi: 10.7868/S0030157415010153
9. Мысленков С. А., Кречик В. А., Бондарь А. В. Суточная и сезонная изменчивость температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по данным термокосы на платформе Д–6 // Экологические системы и приборы. 2017. № 5. С. 25—33.
10. Чубаренко И. П. Горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном: механизм формирования и анализ развития // Океанология. 2010. Т. 50. № 2. С. 184—193. doi: 10.7868/S0030157417050045.
11. Архив погоды на метеостанции: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Пионерском (дата обращения: 13.03.2023).
12. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. // UNESCO (English). No. 56. 196 p.

13. Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman Upwelling Criterion with In Situ Temperature Measurements in the Southeastern Baltic Sea // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11. No. 1. 179 p. doi: 10.3390/jmse11010179.
14. Huang B., Liu C., Banzon V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1 // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. P. 2923—2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.
15. NOAA/STAR. 2021. GHRSSST L3U Metop-C AVHRR FRAC ACSPO v2.80 0.02-deg Dataset. Ver. 2.80. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-09-20] at <https://doi.org/10.5067/GHMTA-3US28>.
16. Панин Г. Н., Шульман Е. Н. О влиянии скорости ветра на толщину приповерхностного ламинарного слоя // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1984. Т. 20. № 12. С. 1218—121.
17. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
18. Fer I., Lemmin U., Thorpe S. A. Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter // *Limnol. Oceanogr.* 2002. Vol. 47. No. 2. P. 535—544.
19. Куприянова А. Е., Гриценко В. А. Лабораторное и численное исследование особенностей процесса выхолаживания воды с поверхности в прибрежных водах // *Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 4. С. 484—494. doi: 10.31857/S0002351521040076.
20. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: МИР, 1977. 431 с.
21. Джалурия Й. Естественная конвекция. М.: МИР, 1983. 399 с.
22. Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019, Vol 51. P. 189—215 doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
23. Гинзбург А. И., Федоров К. Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1978. Т. 14. № 1. С. 79—87.
24. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: МИР, 1980. 549 с.
25. Панин Г. Н. Тепло- и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях. М.: Наука, 1985. 208 с.
26. Гинзбург А. И., Федоров К. Н. О критическом пограничном числе Рэлея при охлаждении воды через свободную поверхность // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1978. Т. 14. № 4. С. 433—436.
27. Попов Н. И., Федоров К. Н., Орлов В. М. Морская вода. Справочное руководство. М.: Наука, 1979. 327 с.
28. Хунджуа Г. Г., Андреев Е. Г. Экспериментальное исследование теплообмена между морем и атмосферой при мелкомасштабном взаимодействии // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1974. Т. 10. № 10. С. 1110—1113.
29. Хунджуа Г. Г., Гусев А. М., Андреев Е. Г. и др. О структуре поверхностной холодной пленки океана и о теплообмене океана с атмосферой // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1977. Т. 13. № 7. С. 753—758.
30. Черноусько Ю. Л. Экспериментальные исследования микроконвекции в лабораторных условиях // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1971. Т. 7. № 10. С. 1096—1098.
31. Вершинский Н. В., Соловьев А. В., Гуренко В. В. Опыт регистрации вертикальной микроструктуры температуры и электропроводности в поверхностном слое океана с помощью всплывающего зонда // *Океанология*. 1981. Т. 21. № 4. С. 734—738.
32. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
33. Spangenberg W.G., Rowland W. R. Convective circulation in water induced by evaporative cooling // *Phys. Fluids*. 1961. Vol 4. No. 6. P. 743—750.
34. Мысленков С. А., Кречик В. А., Соловьев Д. М. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термокосы // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2017. № 364. С. 159—169.
35. Dorokhov D., Dudkov I., Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector). Data in brief. 2019. Vol. 25, 104123. doi: 10.1016/j.dib.2019.104123.

36. Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II: Море / под ред. В. В. Сивкова (отв. редактор), Ю. С. Каджояна, О. Е. Пичужкиной, В. Н. Фельдмана. Калининград: Терра Балтика, 2012. 576 с.

References

1. Dobrovolsky A. D., Zalogin B. S. *Morya SSSR = Seas of the USSR*. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1982: 192 p. (In Russ.).
2. *Hydrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR, pod redaktsiyey Terziyeva, F. S., V. A. Rozhkova and A. I. Smirnovoy = Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR*. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992; 3(1): 450 p. (In Russ.).
3. Morozov E. G., Schuka S. A., Golenko N. N. et al. Temperature structure in the coastal zone of the Baltic Sea. *Doklady Akademii Nauk = Proc. of the Academy of Sciences*. 2007; 416(1): (115—118). (In Russ.).
4. *Dinamika vod Baltiyskogo morya v sinopticheskom diapazone prostranstvenno-vremennykh masshtabov, pod red. Ye.A. Zakharchuka = Dynamics of Baltic Sea waters in the synoptic range of spatiotemporal scales*. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 2007: 354 p. (In Russ.).
5. Dvoeglazova N. V., Chubarenko B. V. On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (68) : (407—421). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.
6. Gmyrya E. I., Chubarenko B. V. Quantitative assessment of discharges in the Downstream Pregolya and Deyma rivers (southeast Baltic) according to near-bottom current measurement data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023; (70) : (38—53) (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53.
7. Matthaeus W., Frank H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis. *Cont. Shelf Res.* 1992; (12): 1375—1400.
8. Stepanova N. B., Chubarenko I. P., Schuka S. A. Structure and evolution of the cold intermediate layer in the southeastern part of the Baltic Sea according to field measurements in 2004—2008. *Okeanologiya = Oceanology*. 2015; 57 (1): (32—43). doi: 10.7868/S0030157415010153. (In Russ.).
9. Myslenkov S. A., Krechik V. A., Bondar A. V. Daily and seasonal variability of water temperature in the coastal zone of the Baltic Sea according to the data of the thermal streamer on the D-6 platform. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological systems and devices*. 2017; (5): (25—33). (In Russ.).
10. Chubarenko I. P. Horizontal convective water exchange over the underwater slope: formation mechanism and development analysis. *Okeanologiya = Oceanology*. 2010; 50 (2): (184—193). doi: 10.1134/S0001437010020025 (In Russ.)
11. *Arkhiv pogody na meteostantsii = Weather archive at the weather station*: [Electronic resource]. Access mode: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Pionersky (date of access: 13.03.2023).
12. IOC, SCOR and IAPSO: The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. UNESCO (English). 2010; (56): 196 p.
13. Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman Upwelling Criterion with In Situ Temperature Measurements in the Southeastern Baltic Sea. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023; 11 (1): 179 p. doi: 10.3390/jmse11010179.
14. Huang B., Liu C., Banzon V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate*. 2021; (34): 2923—2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.
15. NOAA/STAR. 2021. GHRSSST L3U Metop-C AVHRR FRAC ACSPO v2.80 0.02-deg Dataset. Ver. 2.80. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-09-20] at <https://doi.org/10.5067/GHMTA-3US28>.
16. Panin G. N., Shulman E. N. On the effect of wind speed on the thickness of the near-surface laminar layer. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1984; 20 (12): (1218—1221). (In Russ.).

17. Lavrova O. Yu., Kostyanoy A. G., Lebedev S. A. et al. *Kompleksnyy sputnikovyy monitoring morey Rossii = Integrated satellite monitoring of the seas of Russia*. Moscow: IKI RAN, 2011: 480 p. (In Russ.).
18. Fer I., Lemmin U., Thorpe S. A. Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter. *Limnol. Oceanogr.* 2002; 47 (2): 535—544.
19. Kupriyanova A. E., Gritsenko V. A. Laboratory and Numerical Study of the Peculiarities of Sea Surface Cooling in Coastal Waters. *Izvestiya RAN. Seriya Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya RAN. Atmos. Ocean. Phys.* 2021; (57): (425—434). doi: org/10.1134/S0001433821040186.
20. Turner J. S. *Buoyancy Effects in Fluids*. New York: Cambridge Univ. Press, 1973: 367 p.
21. Jaluria Y. *Natural Convection Heat and Mass Transfer*. Ed. by S. L. Vishnevetsky. Pergamon, 1980: 326 p.
22. Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes. *Annual Review Fluid Mech.* 2019; (51): 189—215. doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
23. Ginzburg A. I., Fedorov K. N. Cooling of water from the surface under free and forced convection. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1978; 14 (1): (79—87). (In Russ.).
24. Scorer R. *Environmental Aerodynamics*. Wiley, 1978: 488 p.
25. Panin G. N. *Teplo- i massobmen mezhdu vodoyemom i atmosferoy v yestestvennykh usloviyakh = Heat and mass transfer between the reservoir and the atmosphere in natural conditions*. Moscow: Nauka, 1985: 208 p. (In Russ.).
26. Ginzburg A. I., Fedorov K. N. On the critical boundary Rayleigh number for water cooling through a free surface. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1978; 14 (4): (433—436). (In Russ.).
27. Popov N. I., Fedorov K. N., Orlov V. M. *Morskaya voda. Spravochnoye rukovodstvo = Sea water. Reference guide*. Moscow: Nauka, 1979: 327 p. (In Russ.).
28. Khundzhua G. G., Andreev E. G. Experimental study of heat transfer between the sea and the atmosphere during small-scale interaction. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1974; 10 (10): (1110—1113). (In Russ.).
29. Khundzhua G. G., Gusev A. M., Andreyev Ye. G. et al. On the structure of the surface cold film of the ocean and on the heat exchange between the ocean and the atmosphere. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1977; 13 (7): (753—758). (In Russ.).
30. Chernousko Yu. L. Experimental studies of microconvection in laboratory conditions. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1971, 7 (10): (1096—1098). (In Russ.).
31. Vershinsky N. V., Solovyov A. V., Gurenko V. V. Experience in registering the vertical microstructure of temperature and electrical conductivity in the surface layer of the ocean using a floating probe. *Okeanology = Oceanology.* 1981; 21 (4): (734—738). (In Russ.).
32. Fedorov K. N., Ginzburg A. I. *Pripoverkhnostnyy sloy okeana = The Near-Surface Layer of the Ocean*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 303 p. (In Russ.).
33. Spangenberg W. G., Rowland W. R. Convective circulation in water induced by evaporative cooling. *Phys. Fluids.* 1961; 4 (6): 743—750.
34. Myslenkov S. A., Krechik V. A., Soloviev D. M. Water temperature analysis in the coastal zone of the baltic sea based on thermistor chain observations and satellite data. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation.* 2017; (364): (159—169). (In Russ.).
35. *Oil and environment of the Kaliningrad Region. Vol. II: The Sea* / ed. by V. V. Sivkov (editor-in-chief), Yu. S. Kadzhoyan, O. E. Pichuzhkina, V. N. Feldman. Kaliningrad: Terra Baltica. 2012: 576 p. ISBN 978-5-98777-052-8. (In Russ.).
36. Dorokhov D., Dudkov I., Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector). Data in brief. 2019; 25: 104123. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104123>

Информация об авторах

Анастасия Евгеньевна Курпянова, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, младший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, аспирант, kurpiyanova_ae@mail.ru.

Владимир Алексеевич Гриценко, доктор физико-математических наук, профессор, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, ведущий научный сотрудник, gritsenko-vl-al@mail.ru.

Александр Владимирович Килесо, кандидат географических наук, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, младший научный сотрудник.

Ксения Дмитриевна Коробченкова, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, старший лаборант с ВПО, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, аспирант.

Information about authors

Anastasia Kupriyanova, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, junior researcher, Immanuel Kant Baltic Federal University, PhD student.

Vladimir Gritsenko, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, Leading Researcher.

Alexander Kilesa, PhD (Geogr. Sci.), Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, Junior researcher.

Ksenia Korobchenkova, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, senior laboratory assistant with higher professional education, Immanuel Kant Baltic Federal University, PhD student.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 18.07.2023

Принята к печати после доработки 01.11.2023

The article was received on 18.07.2023

The article was accepted after revision on 01.11.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 684—698.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):684—698.

Научная статья
УДК 551.465.4(261.7)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-684-698

Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в районе Капской котловины

Алина Анатольевна Малышева, Татьяна Васильевна Белоненко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
alinamalysheva97@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей Капской котловины при вытягивании фоновым потоком на основе данных океанического реанализа GLORYS12v1. Обсуждается эволюция вихрей разной полярности в течение 7 дней. Показано, что в процессе вытягивания длина вихрей превосходит ширину в среднем в 4 раза. Вытянувшись по горизонтали, вихри становятся филаментами. Максимальные значения энергии соответствуют круглой форме вихря, а минимальные — филаменту. Доступная потенциальная энергия за 7 дней вытягивания вихрей уменьшается в 3 раза для антициклона и в 1,5 — для циклона, а кинетическая энергия в среднем уменьшается в 1,3 раза. Также при вытягивании вихрей растет параметр вертикальной сплюснутости, что связано с частотой Вьяйсяля-Брента и усилением стратификации вод.

Ключевые слова: Агульяс, мезомасштабные вихри, GLORYS12v1, потенциальная энергия, кинетическая энергия, Капская котловина.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда 22-27-00004.

Для цитирования: Малышева А. А., Белоненко Т. В. Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в районе Капской котловины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 684—698. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-684-698.

Original article

Variability of potential and kinetic energy of mesoscale eddies in the Cape Basin

Alina A. Malysheva, Tatyana V. Belonenko

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Summary. It is well known that mesoscale eddies when interacting with a barotropic flow, can undergo rotation and complete elongation. One of the most stable and long-lived eddies, situated in the Cape Basin southwest of Africa, is also subject to this phenomenon, known as elongation. This study aims to analyze the evolution of kinetic and potential energy within the Cape Basin eddies as they deform due to the background flow. We examine the evolution of eddies with different polarities over a 7 day.

By considering two mesoscale eddies within the Cape Basin, we observe that during the elongation process, these eddies change their parameters, with their longitudinal scale increasing on average by a factor of four compared to their transverse scale. Eventually, these elongated eddies transform into filaments. We calculate the kinetic and potential energy of these eddies using the Global Ocean Physics Reanalysis GLORYS12v1 dataset. Our analysis reveals that the maximum energy values correspond to eddies with a circular shape, while the minimum values are associated with horizontally elongated eddies. Consequently, an increase in the elongation parameter ε leads to a decrease in energy. Over a 7-day period of eddy stretching, the potential energy decreases by a factor of 3 for anticyclonic eddies and by a factor of 1.5 for cyclonic eddies. The kinetic energy, on average, decreases by a factor of 1.3. It's worth noting that during the evolution of these eddies, the compression parameter increases in proportion to the Väisälä-Brunt frequency, which is linked to heightened water stratification.

Keywords: Agulhas, mesoscale eddies, GLORYS12v1, potential energy, kinetic energy, Cape Basin.

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project 22-27-00004.

For citation: Malysheva A. A., Belonenko T. V. Variability of potential and kinetic energy of mesoscale eddies in the Cape Basin. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):684—698. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-684-698.

Введение

Мезомасштабные вихри играют важную роль в океанической циркуляции. Они обладают собственной динамикой, в которой доминируют нелинейные эффекты. Вихри способны переносить тепло, массу, кинетическую энергию и биохимические характеристики из области своего образования на значительные расстояния, оказывая влияние на климат [1—4]. Несмотря на повсеместное распространение мезомасштабных вихрей [5], районы вихревой активности, как правило, приурочены к областям крупномасштабных течений, бароклинная и баротропная неустойчивость которых является причиной генерации мезомасштабных вихрей в океане. Другой важной причиной их генерации является взаимодействие вихрей друг с другом, деление, слияние вихрей и трансформация.

Регион, расположенный к юго-западу от африканского континента, характеризуется повышенным вихреобразованием. Здесь мезомасштабные вихри могут генерироваться и дрейфовать, взаимодействуя с течением Агульяс [6—8]. Д. Олсон и Р. Эванс [9] показали, что вихри течения Агульяс в среднем имеют диаметр 240 ± 40 км, орбитальная скорость колеблется от 30 см/с до 90 см/с, скорость дрейфа варьируется от 5,5 см/с до 9 см/с (от 5 до 8 км/сут). Эти вихри, имея большой водообменный потенциал, способны преодолевать тысячи километров, являясь доминирующими структурами, переносящими теплые и соленые воды Индийского океана в Атлантический. Данное явление меж океанского обмена, называемое также Агульясовым переносом, может оказывать существенное влияние на колебания климата [1, 3]. Переносимые в Южную Атлантику воды состоят в основном из верхних и средних вод Индийского океана [10]. Таким образом, вихри Агульяс пересекают Южную Атлантику, питая при этом поверхностные воды атлантической меридиональной термохалинной циркуляции теплыми и солеными водами Индийского океана [11—13].

Агульясов перенос также влияет на общую циркуляцию в Атлантическом океане посредством создания изопикнических неоднородностей, которые производят

возмущения в виде медленно распространяющихся волн Россби, проявляющихся в виде систем когерентных мезомасштабных вихрей, движущихся на запад [2, 13].

Теоретические исследования показали, что при взаимодействии вихрей с баротропным потоком существует три варианта поведения мезомасштабных вихрей: вращение, нутационные колебания и неограниченное вытягивание [14]. Эволюция вихрей путем вытягивания сопровождается потерей кинетической и доступной потенциальной энергии [15]. Вытянутый вихрь в теоретических исследованиях называют вихревой нитью, а при анализе спутниковой или натурной информации — филаментом. Термин «филамент» широко используется в океанологических исследованиях [14].

Механизмы образования филаментов известны и описывались во многих работах [16—19]. В работе [15] рассмотрена эволюция мезомасштабного антициклонического вихря, расположенного в Лофотенской котловине, который, будучи изначально круглым в горизонтальном плане, постепенно превратился в филамент. Процесс эволюции авторы наблюдали на последовательных картах, построенных по данным реанализа, в течение трех недель. Авторы отмечают практически линейное уменьшение энергии при вытягивании вихря.

Возникает вопрос, можно ли наблюдать вытягивание вихрей в области Капской котловины, расположенной к юго-западу от Африки, где вихри являются более устойчивыми и долгоживущими? В работе [20] проанализировано 28018 циклонов и 26478 антициклонов и показано, что антициклоны Агульясова переноса, являясь более долгоживущими, чем циклоны, перемещаются на северо-запад почти прямолинейно и, преодолевая тысячи километров, пересекают Южную Атлантику. Отмечается следующая закономерность: антициклоны при своем движении на запад под действием бэта-эффекта отклоняются к экватору, а циклоны — к Южному полюсу. Предлагаются различные физические механизмы этого явления, обсуждение которых можно найти в работе [20].

В.В. Жмур и др. [14, 21] теоретически показали, что в океане существуют области, где запрещено вытягивание вихрей и где имеется потенциальная возможность к их вытягиванию. При наличии данных о течениях в океане можно на картах построить географические распределения этих областей и рассчитать их площади. Авторы построили такие распределения для различных регионов Мирового океана и показали, что интегральная площадь областей, где вихри могут вытягиваться, превышает площади, где вытягивание вихрей отсутствует.

Анализируя радиолокационные снимки поверхности океана, можно наблюдать множество филаментов. Есть основания предполагать, что часть из них образовалась в процессе вытягивания мезомасштабных вихрей (см. пример [21]). Однако задача — проанализировать трансформацию вихрей на основе натуральных наблюдений — является практически неразрешимой и опирается в отсутствие соответствующей информации о течениях с необходимым пространственным разрешением данных. Тем не менее, в работе [15] рассматривается эволюция вихря путем вытягивания по данным реанализа GLORYS12V1 и проанализировано изменение его кинетической и доступной потенциальной энергии. В настоящей работе также применяются данные реанализа GLORYS12V1 и рассматриваются два

новых примера, демонстрирующих вытягивание вихрей. Таким образом, целью данной работы является анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в процессе вытягивания, расположенных в Капской котловине.

Данные

Основным источником данных в нашем исследовании является вихревой реанализ Мирового океана GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis), доступный на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Массив включает в себя такие параметры, как температура, соленость, скорость течений, высота поверхности моря и другие. Реанализ основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS. GLORYS12V1 ассимилирует спутниковые и *in situ* данные. Основой реанализа является модель NEMO, где в качестве форсинга используется атмосферный реанализ ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). В уравнениях модели применяется приближение Буссинеска. Различные типы наблюдений ассимилируются с использованием фильтра Калмана (SEEK — Singular Evolutive Extended Kalman). Аномалии уровня моря (SLA) получены с помощью спутникового альтиметра, температура поверхности моря (SST) — со спутника AVHRR из NOAA, а вертикальные профили температуры и солености (T/S) *in situ* из базы данных CORA с контролем качества CMEMS. В качестве эталона для ассимиляции альтиметрических данных также использовалась «гибридная» средняя динамическая топография (MDT), основанная на CNES-CLS13 MDT.

Пространственное разрешение данных составляет $1/12^\circ$ на 50 уровнях за период, когда доступны альтиметрические наблюдения. Временная дискретность — одни сутки.

Результаты

Последние исследования, связанные с деформацией вихрей при взаимодействии с фоновым течением (например, [15, 18]), показали, что мезомасштабные вихри в определенных случаях могут быть вытянуты в филаменты, и, вытягиваясь, вихри перераспределяют тем самым энергию с мезомасштаба на субмезомасштаб. Как известно, мезомасштабные и субмезомасштабные процессы имеют различный пространственный размер. Как критерий оценки масштаба явления используют бароклинный радиус деформации Россби:

$$R_d = \frac{N^*}{f} H,$$

где f — параметр Кориолиса, N^* — характерное значение частоты Вьяйсяля-Брента, H — вертикальный размер явления. Если горизонтальный размер явления (L) $< R_d$, то явление относится к субмезомасштабу, если $L > R_d$ — к мезомасштабу. Для описания масштабов также используется число Россби, являющееся отношением сил инерции к силе Кориолиса:

$$R_0 = \frac{U}{fL},$$

где U — горизонтальная составляющая скорости, L — горизонтальный размер.

Для больших масштабов L число Россби мало: $Ro < 1$. Из формулы также следует, что при уменьшении горизонтального размера число Россби возрастает. Переход явления к субмезомасштабу приводит к большим числам Россби и агеострофическому ускорению.

Для того, чтобы оценить поведение вихрей Капской котловины при вытягивании, были рассчитаны две основные динамические характеристики вихрей: относительная (ζ) и потенциальная по Эртелю (PV) завихренности:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

где u и v — зональная и меридиональная составляющие скорости потока, ось координат правая: ось x направлена на восток, ось y — на север, z — вертикальная ось.

$$PV = \frac{(\zeta + f) \frac{\partial p}{\partial z}}{\rho_0},$$

где ρ — плотность воды, ρ_0 — референтная плотность воды, здесь $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$. Для расчета производных использовалась прямая разностная схема. Одним из ключевых свойств потенциальной завихренности является выполнение теоремы о проницаемости [22, 23]: чистый перенос PV через изопикнические поверхности отсутствует, следовательно, выполняется закон сохранения потенциальной завихренности, который является аналогом закона сохранения количества движения. Но так как системы в океане не замкнуты, потенциальная завихренность изменяется в процессе эволюции вихрей наравне с изменениями других динамических и кинематических характеристик.

Для исследования было построено и проанализировано множество полей потенциальной завихренности по Эртелю на наличие вихрей, способных к вытягиванию. Среди прочих было найдено два вихря различной полярности, располагающихся на наименьшем расстоянии друг от друга и вытягивающихся практически одновременно, что является репрезентативным. На рис. 1 и 2 показаны два вихря в начальный и конечный момент их эволюции путем вытягивания. Один из вихрей — антициклон, другой — циклон. Эти два вихря различной полярности, которые продемонстрировали способность к вытягиванию в филаменты в течение 7 дней, и были выбраны для дальнейшего анализа в качестве примера. Центры вихрей на начальный момент времени расположены на 9° в. д. и 39.2° ю. ш. (антициклон) и на 12° в. д. и 36.5° ю. ш. (циклон). Стоит отметить, что для выбранных вихрей значения числа Россби варьируются в диапазоне от 0,03 до 0,05, что является довольно малым значением, это говорит о большой нелинейности вихрей. На рис. 1 и 2 видно, что происходит изменение формы этих вихрей: если на начальную дату наблюдений (19.12.2001) вихри имеют форму эллипсов, то в конце

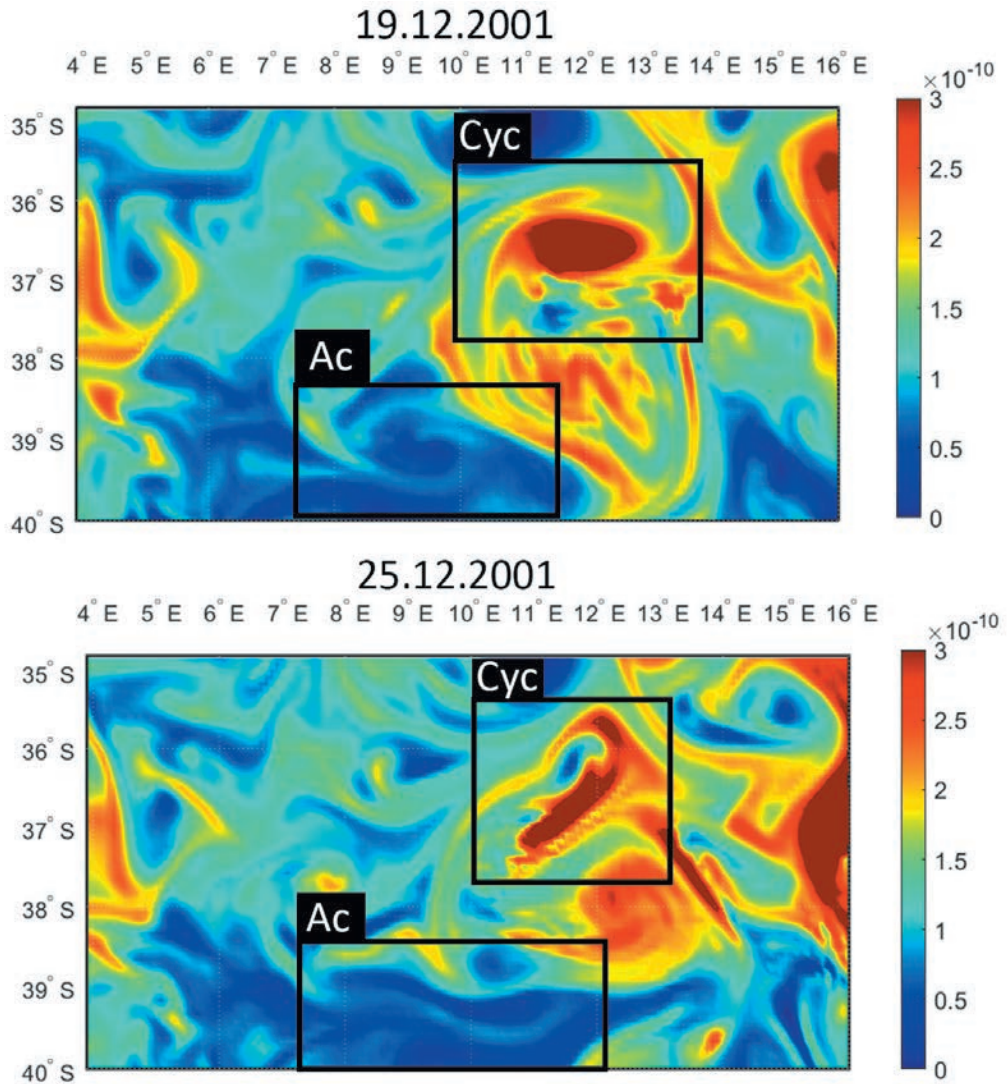


Рис. 1. Потенциальная завихренность по Эртлю ($\text{m}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$) в начальный (19.12.2001) и конечный момент (25.12.2001) эволюции изначально круглых в горизонтальном плане вихрей в филаменты. Черными прямоугольниками выделены антициклон (Ac) и циклон (Cyc). Горизонт наблюдений — 200 м.

Fig. 1. Potential vorticity according to Ertel ($\text{m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) at the initial (December 19, 2001) and final moments (December 25, 2001) of the evolution of initially round in horizontal plan vortices into filaments. The anticyclone (Ac) and cyclone (Cyc) are highlighted by black rectangles. Observation depth — 200 m.

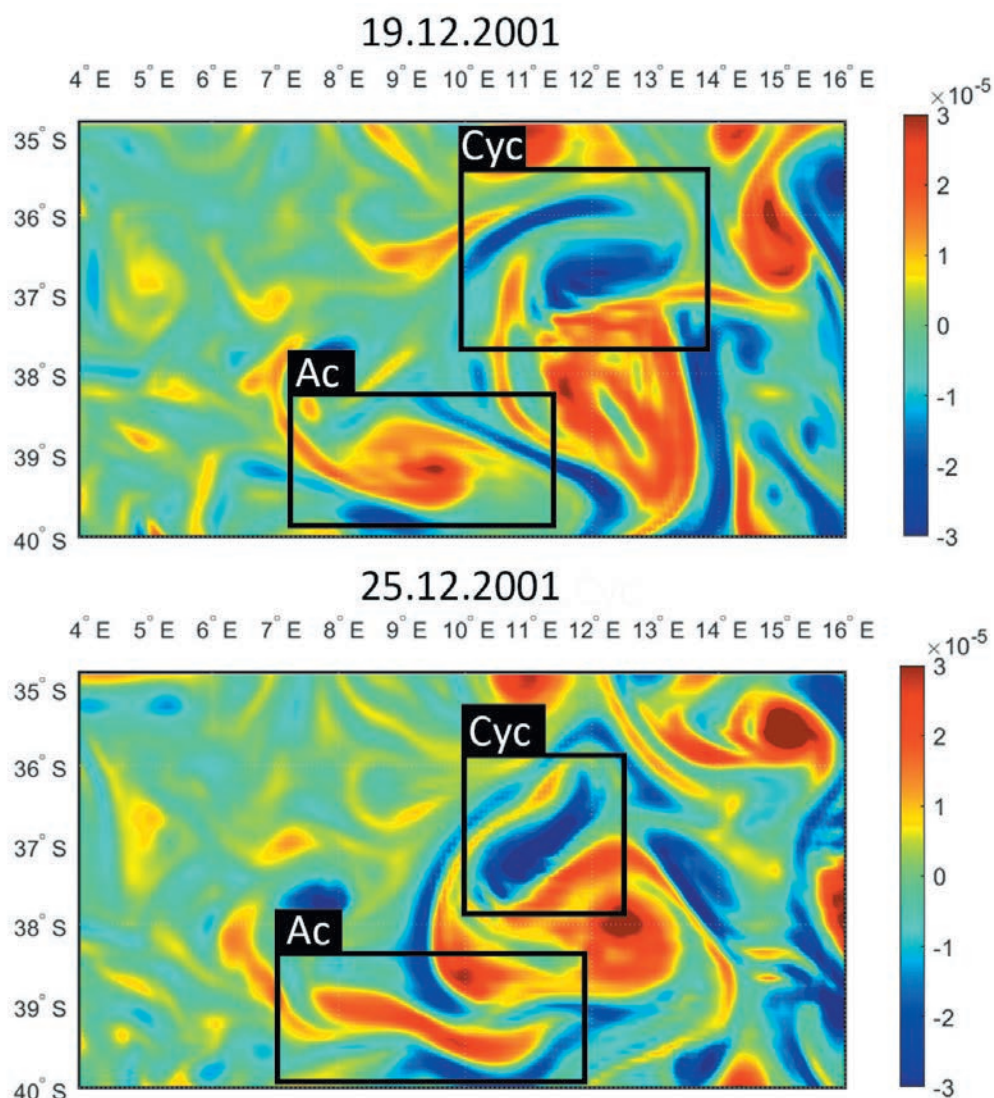


Рис. 2. Относительная завихренность (s^{-1}) в начальный (19.12.2001) и конечный момент (25.12.2001) эволюции изначально круглых в горизонтальном плане вихрей в филаменты. Черными прямоугольниками выделены антициклон Ас (положительные значения) и циклон Сус (отрицательные значения относительной завихренности). Горизонт наблюдений — 200 м.

Fig. 2. Relative vorticity (s^{-1}) at the initial (December 19, 2001) and final moments (December 25, 2001) of initially round in horizontal plan vortices into filaments. Black rectangles highlight the anticyclone (Ac) with positive vorticity values and the cyclone (Cyc) with negative relative vorticity values. The observation depth is 200 m.

периода наблюдений (25.12.2001) вихри вытягиваются так, что длина превосходит ширину в 4,5 раза для антициклона и в 3,5 раза — для циклона.

В работе В. В. Жмур и др. [21] рассматривается различное поведение мезомасштабных вихрей при их взаимодействии с баротропным потоком. По данным океанического реанализа при использовании параметров, которые описывают пространственную изменчивость фонового течения: угловую скорость вращения жидких частиц в фоновом течении (γ) и коэффициент деформации фонового течения (e), — авторы проанализировали зависимость γ от e (γ/e). По данному соотношению определяются области, где допустимо вытягивание вихрей в филаменты и где такого вытягивания не происходит. Применение данной теории к различным регионам Мирового океана представлено в работе [21].

На рис. 3 дано распределение коэффициентов γ/e в области Капской котловины на 25.12.2001, что соответствует конечной дате наблюдения за вихрями, их максимальному вытягиванию. Если соотношение $|\gamma/e| \leq 1$ справедливо в каком-то районе, то в этом районе разрешено неограниченное вытягивание вихрей. В другом случае при $|\gamma/e| > 1$ вытягивание запрещено. Если в зоне разрешено неограниченное вытягивание вихрей, то часть имеющихся вихрей вытянутся в филаменты. На рис. 3 красный цвет соответствует областям, где вытягивание вихрей в филаменты запрещено, синий цвет — где разрешено неограниченное вытягивание вихрей. Черными прямоугольниками обозначены области расположения выбранных для анализа вихрей (см. рис. 1 и 2). Можно увидеть, что там, где происходит вытягивание антициклонического вихря (центр вихря), область окрашена голубым цветом, то есть вытягивание разрешено. Обе же части, на которые вихрь разделился, напротив, окрашены красным, они не вытягиваются. В зоне циклона наблюдается та же ситуация: вытягивающийся центр вихря окрашен в синий, а части вихря, которые в итоге при вытягивании отделяются от материнского вихря, обозначены красным. Таким образом, мы наблюдаем вытягивание вихрей и дальнейшее преобразование их в вихри меньших масштабов. При этом происходит перераспределение энергии с мезомасштаба на субмезомасштаб.

Основными параметрами, характеризующими вытянутость вихрей, являются безразмерный параметр вытянутости $\varepsilon = \frac{a}{b} \geq 1$ и эффективный радиус $r_0 = \sqrt{ab}$, где

a — большая горизонтальная полуось вихря, b — малая горизонтальная полуось. На рис. 4 представлен график изменения ε и r_0 по мере вытягивания вихрей. На начальный момент времени $\varepsilon = 1$ для Ас и 1,2 для Суs, так как вихри практически круглые. При вытягивании вихрей параметр вытянутости растет, так как длина значительно превосходит ширину, эффективный радиус, в свою очередь, растет на 17 % для антициклона и на 6 % — для циклона.

На рис. 5 представлены графики безразмерного параметра вертикальной сплюснутости ядра вихря $K = \frac{Nc}{f r_0}$, где c — вертикальная полуось вихря, и частоты

Вяйсяля-Брента (N). Видно, что параметр K согласован с частотой Вяйсяля-Брента. В течение эволюции вихрей параметры пропорционально растут. Увеличение частоты Вяйсяля-Брента связано с усилением стратификации вод.

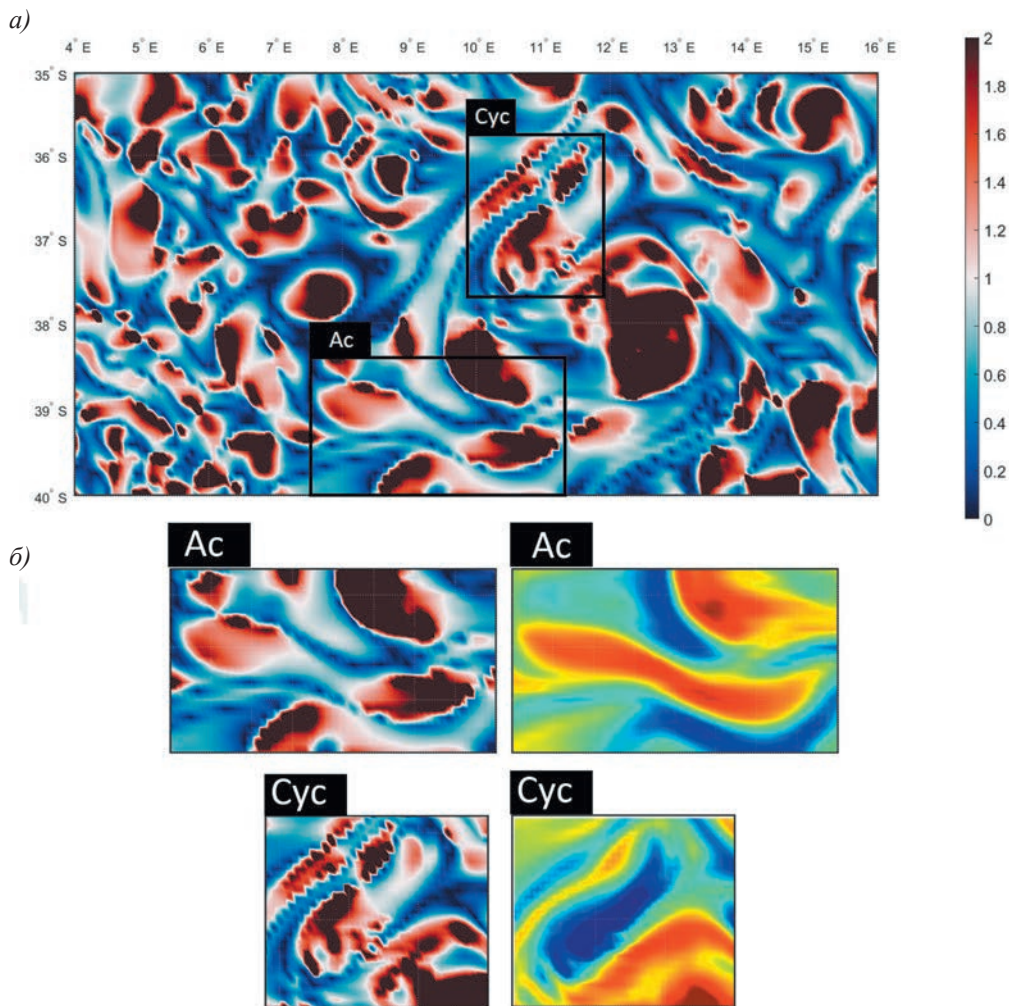


Рис. 3. Распределение коэффициентов γ/e (s^{-1}) в районе Капской котловины на 25.12.2001 г. Горизонт — 200 м. Черными прямоугольниками обозначены области расположения выбранных для анализа вихрей. Ac — антициклон, cyc — циклон (a); б) — приближенные фрагменты вихрей в поле коэффициентов γ/e (слева) в сравнении с теми же вихрями в поле относительной завихренности (справа).

Fig. 3. Distribution of coefficients γ/e (s^{-1}) in the region of the Cape Basin on December 25, 2001. The depth is 200 m. The black rectangles indicate the locations of the eddies selected for analysis. Ac is the anticyclone, cyc is the cyclone (a); b) approximate fragments of the eddies in the field of coefficients γ/e (left) in comparison with the same eddies in the field of relative vorticity (right).

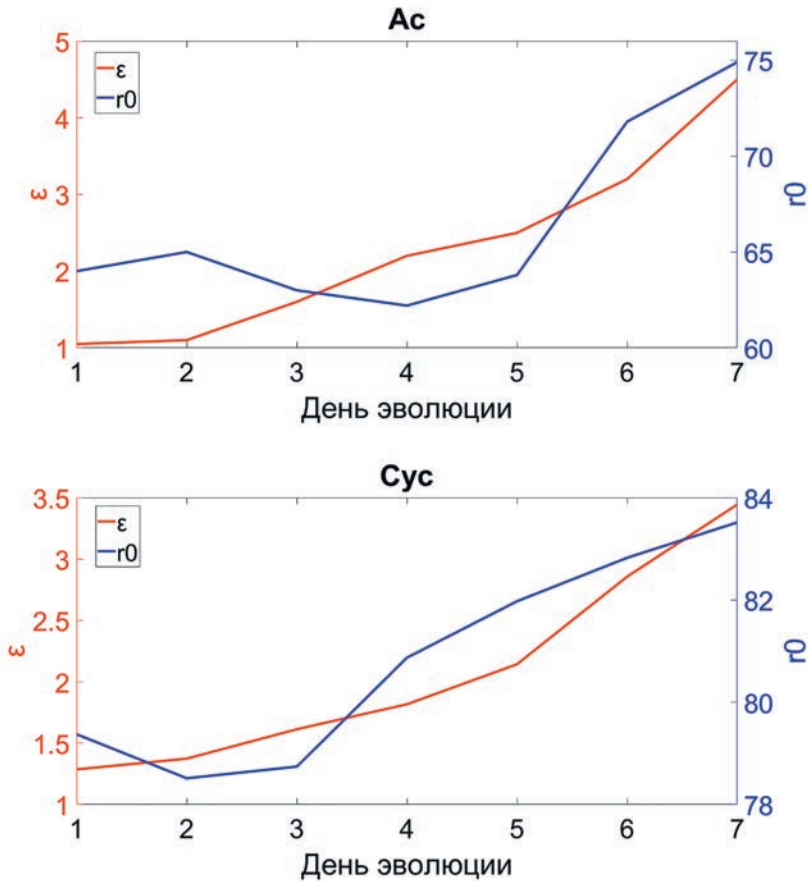


Рис. 4. Безразмерный параметр вытянутости вихрей ε (красным) и их эффективный радиус (синим). Антициклон — A_c , C_{yc} — циклон. По оси x показаны дни эволюции вихря от начала наблюдений с 19.12.2001 г. по 25.12.2001 г.

Fig. 4. Dimensionless parameter of eddy elongation ε (red) and their effective radius (blue). Anticyclone — A_c , C_{yc} — cyclone. The x -axis shows the days of eddy evolution from the beginning of observations from 12/19/2001 to 12/25/2001.

Далее оцениваем потенциальную и кинетическую энергию двух вихрей отдельно. Потенциальная энергия рассчитывалась по формуле:

$$EP=0,5 \iiint \left[\frac{g^2 \rho^2(x,y,z)}{\rho_0(z)N^2(x,y,z)} dx dy dz \right],$$

где g — ускорение свободного падения; $\rho = (\rho_\Sigma - \rho_0)$ — отклонение текущей плотности ρ_Σ от ρ_0 . Масштабы вихря определяют границы интегрирования: изолинии нулевой относительной завихренности показывают горизонтальные границы, вертикальные — от 0 до 1000 м.

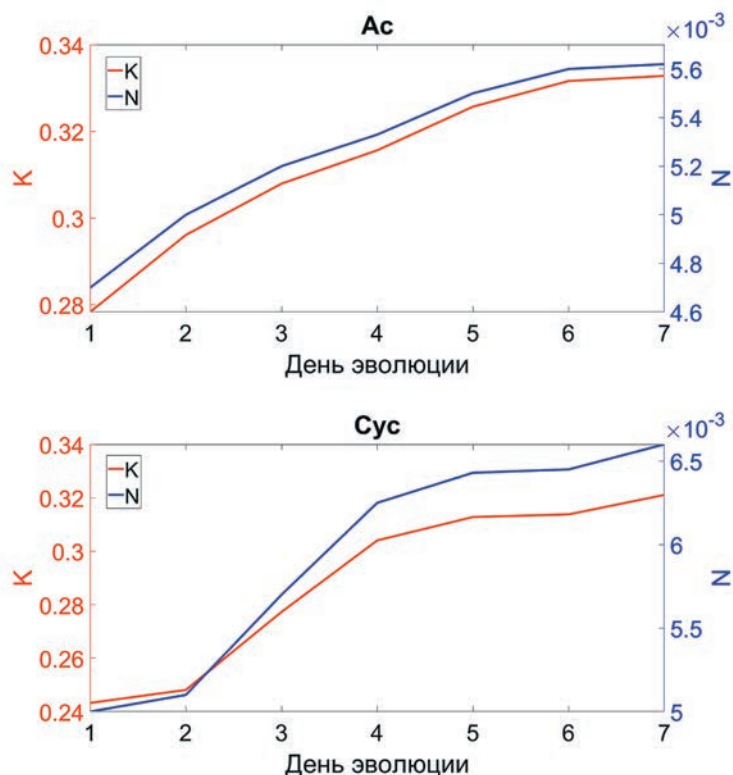


Рис. 5. Безразмерный параметр вертикальной сплюснутости вихревого ядра (K) (красный цвет) и частота Вэйсälä-Брента (N) (синий цвет) вихрей (антициклон Ас и циклон Сус). По оси x показаны дни эволюции вихря в период с 19.12.2001 г. по 25.12.2001 г.

Fig. 5. The dimensionless parameter of vertical vortex core flattening (K) is depicted in red, while the Väisälä-Brent frequency (N) is shown in blue for both anticyclone (Ac) and cyclone (Cyc). The x -axis represents the days of vortex evolution during the period from December 19, 2001, to December 25, 2001.

Для кинетической энергии использовалась формула [17]:

$$EK=0,5 \iiint \left[\rho_{\Sigma}(x,y,z) (u^2(x,y,z) + v^2(x,y,z)) \right] dx dy dz.$$

На рис. 6 видно, что потенциальная энергия антициклонического вихря на 3 порядка больше его кинетической энергии. С течением времени и при вытягивании формы антициклона энергия уменьшается. У циклонического вихря наблюдается та же ситуация: потенциальная энергия уменьшается по мере вытягивания вихря, причем кинетическая энергия на 1 порядок меньше потенциальной. Важно уточнить, что последний день наблюдений не является днем диссипации вихря, а является днем максимального вытягивания формы. Таким образом, с изменением формы циклонического и антициклонического вихря его кинетическая и потенциальная энергия убывает. Максимальные значения энергии соответствуют

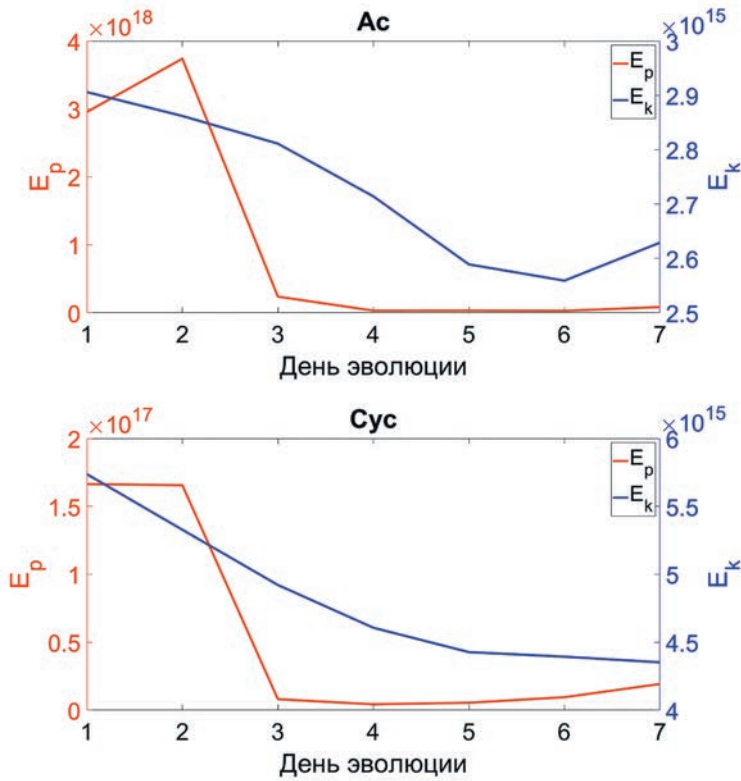


Рис. 6. Доступная потенциальная (красный цвет) и кинетическая (синий цвет) энергия вихрей (Дж). По оси x показаны дни эволюции вихрей в период с 19.12.2001 г. по 25.12.2001 г.

Fig. 6. The available potential energy (in red) and kinetic energy (in blue) of vortices (Joules). The x-axis represents the days of vortex evolution during the period from December 19, 2001, to December 25, 2001.

круглой форме вихрей обеих полярностей, а минимальные — вытянутой форме, что согласуется с теорией (например, [15]).

Заклучение

В работе рассматриваются мезомасштабные вихри Капской котловины различной полярности, которые в течение 7 дней изменяют свою форму, преобразовываясь в процессе эволюции в филаменты. На основе данных реанализа GLORYS12V1 установлено, что в процессе деформации вихрей баротропным потоком происходит изменение горизонтальных полуосей вихрей: большая полуось a максимально увеличивается, а малая b — значительно уменьшается. Вертикальный же размер вихрей остается неизменным. Вытянувшийся по горизонтали вихрь (филамент) хорошо наблюдается в поле относительной завихренности, так как в вытянутом ядре значения относительной завихренности максимальны по модулю. За 7 дней эволюции вихри

вытянулись так, что продольный масштаб в 4,5 раза превышает поперечный для антициклона и в 3,5 для циклона. Вытягиваясь в филаменты, вихри теряют энергию: максимальные значения всех видов энергии соответствуют круглой форме вихрей, а минимальные — вытянутой форме. Следовательно, при увеличении параметра вытянутости ϵ происходит уменьшение энергии: за 7 дней вытягивания вихрей потенциальная энергия уменьшается в 3 раза для антициклона и в 1,5 — для циклона, а кинетическая энергия в среднем уменьшается в 1,3 раза. Также при деформации вихрей пропорционально частоте Вайсяля-Брента растет параметр вертикальной сплюснутости, что связано с усилением стратификации вод.

Таким образом, на примере двух вихрей в Капской котловине (циклона и антициклона) мы показали, что при изменении их формы путем вытягивания уменьшается кинетическая и доступная потенциальная энергия этих вихрей. Так как при вытягивании вихрей форма изменяется таким образом, что одна из осей эллипсоида в горизонтальном плане становится больше другой в несколько раз, то это означает переход энергии вихрей из мезомасштаба в субмезомасштаб. Однако энергия никуда не исчезает, и ее уменьшение в вихрях свидетельствует, что часть энергии перешла в течение. При перераспределении энергии из мезомасштаба в субмезомасштаб происходит прямой каскад, и наоборот: когда энергия от вихрей переходит к течениям — обратный каскад энергии (см. [16]).

Список литературы

1. Gordon A. L., Weiss R. F., Smethie W. M., Warner M. J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 1992. Vol. 97 (C5). P. 7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
2. Biastoch A., Böning C. W., and Lutjeharms J. R. E. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature*. 2008. Vol. 456. P. 489—492. doi:10.1038/nature07426.
3. Donners J., Drijfhout S. S., Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31 (16). L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
4. Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., and Raj R. P. Evaluation of heat and salt transports by mesoscale eddies in the Lofoten Basin // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 20. 6011. <https://doi.org/10.2205/2020ES000720>.
5. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in oceanography*. 2011. Vol. 91(2). P. 167—216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
6. Boebel O., Rossby T., Lutjeharms J. et al. Path and variability of the Agulhas Return Current // *Deep Sea Research*. 2003. Part II. Vol. 50. P. 35—56.
7. Lutjeharms J. R. E. Three decades of research on the greater Agulhas Current // *Ocean Science*. 2007. Vol. 3. P. 129—147.
8. Lutjeharms J. R. E. *The Agulhas Current*. Springer-Verlag, Berlin, 2006. 329 p.
9. Olson D. B., Evans R. H. Rings of the Agulhas current // *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*. 1986. Vol. 33(1). P. 27—42. doi:10.1016/0198-0149(86)90106-8.
10. Doglioli A. M., Veneziani M., Blanke B. et al. Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model // *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 33. L14611.
11. Gordon A. L., Haxby W. F. Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990. Vol. 5(C3), P. 3117—3125. doi:10.1029/JC095iC03p03117.
12. Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018. Vol. 139. P. 104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.

13. Малышева А. А., Колдунов А. В., Белоненко Т. В., Сандалюк Н. В. Вихри Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии // Ученые записки РГГМУ. 2018. №52. С. 154—170.
14. Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б. П. Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508 (2). С. 270—274.
15. Жмур В. В., Травкин В. С., Белоненко Т. В., Арутюнян Д. А. Трансформация кинетической и потенциальной энергии при вытягивании мезомасштабного вихря // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38(5). С. 466—480. doi:10.22449/0233-7584-2022-5-466-480.
16. Жмур В. В. Мезомасштабные вихри океана. М.: ГЕОС, 2011. 289 с.
17. Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow // Journal of the Physical Society of Japan. 1981. Vol.50 (10). P. 35173520. doi:10.1143/JPSJ.50.3517.
18. Жмур В. В., Панкратов К. К. Динамика мезомасштабного вихревого образования в поле течения крупного интенсивного вихря // Океанология. 1990. Т.30 (2). С. 170—178.
19. Травкин В. С., Жмур В. В., Белоненко Т. В. Вклад мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины в ее энергетiku // Российский журнал наук о Земле. 2022. Т. 22. ES4002. doi:10.2205/2022ES000802.
20. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A.V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21. ES5003. doi:10.2205/2021ES000773.
21. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П. О вытягивании мезомасштабных вихрей в филаменты и распределении их на поверхности океана // Известия вузов. Радиофизика. 2023. Т. LXVI (2—3).
22. Haynes P., McIntyre M. On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces // J. Atmos. Sci. 1987. Vol. 44 (5). P. 828—841.
23. Haynes P., McIntyre M. On the conservation and impermeability theorems for potential vorticity // J. Atmos. Sci. 1990. Vol. 47 (16). P. 2021—2031.

References

1. Gordon A. L., Weiss R. F., Smethie W. M., Warner M. J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*. 1992; 97 (C5): 7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
2. Biastoch A., Böning C. W., and Lutjeharms J. R. E. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*. 2008, (456): 489—492. doi:10.1038/nature07426.
3. Donners J., Drijfhout S. S., Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model. *Geophysical Research Letters*. 2004; 31:(16): L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
4. Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., and Raj R. P. Evaluation of heat and salt transports by mesoscale eddies in the Lofoten Basin. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020; (20): 6011. doi:10.2205/2020ES000720.
5. Chelton D. B., Schlax M. G., and Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*. 2011; 91(2): 167—216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
6. Boebel O., Rossby T., Lutjeharms J. et al. Path and variability of the Agulhas Return Current. *Deep Sea Research. Part II*. 2003; (50): 35—56.
7. Lutjeharms J. R. E. Three decades of research on the greater Agulhas Current. *Ocean Science*. 2007; (3): 129—147.
8. Lutjeharms J. R. E. The Agulhas Current. Springer-Verlag, Berlin, 2006: 329 p.
9. Olson D.B., Evans R. H. Rings of the Agulhas current. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*. 1986; 33(1): 27—42. doi:10.1016/0198-0149(86)90106-8.
10. Doglioli A. M., Veneziani M., Blanke B. et al. Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model. *Geophysical Research Letters*. 2006; 33: L14611.
11. Gordon A. L., Haxby W. F. Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990; 5(C3): 3117—3125. doi:10.1029/JC095iC03p03117.

12. Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018; (139): 104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.
13. Malysheva A. A., Koldunov A. V., Belonenko T. V., Sandalyuk N. V. Agulhas leakage eddies based on satellite data. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2018; (52): (154—170). (In Russ.).
14. Zhmur V. V., Belonenko T. V., Novoselova E. V., Suetin B. P. Direct and Inverse Energy Cascades in the Ocean during Vortex Elongation. *Doklady Earth Sciences. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences*, 2022; 507(3): (457—460). (In Russ.). doi: 10.1134/S1028334X22601675.
15. Zhmur V. V., Travkin V. S., Belonenko T. V., Arutyunyan D. A. Transformation of Kinetic and Potential Energy during Elongation of a Mesoscale Vortex. *Physical Oceanography*. 2022; 29(5): 449-462. doi:10.22449/1573-160X-2022-5-449-462.
16. Zhmur V. V. *Mezomasshtabnye vihri okeana = Mesoscale ocean eddies*. M.: GEOS, 2011: 289 p. (In Russ.).
17. Kida S. Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1981; 50 (10): 3517-3520. doi:10.1143/JPSJ.50.3517.
18. Zhmur V. V., Pankratov K. K. Dynamics of mesoscale eddy formation in the flow field of a large intense eddy. *Okeanologiya = Oceanology*. 1990; 30 (2): (170—178). (In Russ.).
19. Travkin V. S., Zhmur V. V., Belonenko T. V. Contribution of mesoscale eddies of the Lofoten Basin to its energy. *Rossiiskij zhurnal nauk o Zemle = Russ. J. Earth. Sci.* 2022; 22: ES4002. doi:10.2205/2022ES000802. (In Russ.).
20. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021; 21: ES5003. doi:10.2205/2021ES000773.
21. Zhmur V. V., Belonenko T. V., Novoselova E. V., Suetin B. P. On the stretching of mesoscale eddies into filaments and their distribution on the surface of the ocean. *Izvestiya vuzov. Radiofizika = News of universities. Radiophysics*. 2023; LXVI (2—3). doi: 10.52452/00213462_2023_66_02_104. (In Russ.).
22. Haynes P., McIntyre M. On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces. *J. Atmos. Sci.* 1987; 44 (5): 828—841.
23. Haynes P., McIntyre M. On the conservation and impermeability theorems for potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 1990; 47 (16): 2021—2031.

Информация об авторах

Мальшева Алина Анатольевна, кафедра океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, инженер-исследователь, alinamalysheva97@mail.ru.

Белоненко Татьяна Васильевна, д-р геогр. наук, профессор кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, t.v.belonenko@spbu.ru.

Information about authors

Malysheva Alina Anatol'evna, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, research engineer, alinamalysheva97@mail.ru.

Belonenko Tatyana Vasil'evna, Dr. Sci. (Geogr.), professor, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, t.v.belonenko@spbu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 08.07.2023

Принята к печати после доработки 22.10.2023

The article was received on 08.07.2023

The article was accepted after revision on 22.10.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 699—710.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):699—710.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
556.555(282.257.583.1)«324»
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-699-710

Гидрологическая и гидрохимическая характеристика юго-западной части озера Ханка в зимний период 2016 г.—2023 г.

*Ольга Игоревна Катайкина, Владимир Иванович Матвеев,
Александр Леонидович Фигуркин*

Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии, Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия, olga.kataykina@tinro.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности изменений гидрохимических характеристик в озере Ханка в зимний период года. Подо льдом прогреваются придонные воды за счет запаса тепла, накопленного грунтом в теплый период. При этом происходит активное развитие фитопланктона, вследствие чего относительное содержание растворенного кислорода может достигать 180 %. Высокие значения БПК₅ свидетельствуют о разложении большого количества органического вещества и окислении органики, поступающей в воду с бытовыми отходами. Наблюдается рост фосфатов, нитратов, нитритов и аммония, что вероятно связано с интенсивным использованием озера в последние годы.

Ключевые слова: озеро Ханка, температура, мощность ледяного покрова, растворенный кислород, биогенные вещества, трофность.

Для цитирования: Катайкина О. И., Матвеев В. И., Фигуркин А. Л. Гидрологическая и гидрохимическая характеристика юго-западной части озера Ханка в зимний период 2016 г.—2023 г. // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 699—710. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-699-710.

GEOECOLOGY

Original article

Hydrological and chemical characteristics of the south-western part of Lake Khanka in winter, 2016—2023

Olga I. Kataykina, Vladimir I. Matveev, Alexander L. Figurkin

Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO, Pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia.

Summary. Hydrological and chemical conditions of Lake Khanka in winter season are considered on the data of surveys conducted in 2016—2023 and cited materials. The lake is completely covered by

ice in winter that potentially can worsen oxygenation of its waters. The thickness of ice related inversely on the mean air temperature in winter. The water temperature under the ice ranged from +0,2 to +1,5 °C and were rather stable at the depth below of 3,0–3,5 (+4,0-4,4 °C), with slow heightening to the bottom because of the heat return flux from the bottom grounds accumulated in warm season. In spite of the ice cover, high content of dissolved oxygen was observed in the water. It was accompanied with high values of biochemical oxygen demand indicating the water enrichment by phytoplankton that bloomed under the ice in conditions of sunny weather and high transparency of the ice. Extremely high water level prevailed in Lake Khanka in the late 2010s, but the level dropped in recent years. The lake is subjected to intensive agriculture and recreational exploitation after the distribution of “free hectares” that caused heightening the nutrients concentration, in particular inorganic forms of phosphorus and nitrogen.

Keywords: Lake Khanka, 兴凯湖 [Xīngkǎi Hú], water temperature, ice cover, dissolved oxygen, nutrients, trophicity.

For citation: Kataykina O. I., Matveev V. I., Figurkin A. L. Hydrological and chemical characteristics of the south-western part of Lake Khanka in winter, 2016-2023. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):699—710. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-699-710.

Введение

Мелководные замерзающие озера широко распространены в умеренной и субполярной зонах североамериканского и евразийского континентов. На территории США, Канады, североевропейских стран, России насчитывается более 600 000 таких озер, при этом регулярные гидрофизические наблюдения проводятся лишь на нескольких сотнях из них. Наименее изученным остается зимний режим таких озер, несмотря на то, что ледостав на них продолжается несколько месяцев и оказывает существенное влияние на состояние и функционирование их экосистем [1, 2]. Снежно-ледовый покров изолирует водоем от прямого воздействия атмосферы, исключает ветровое перемешивание, ограничивает проникновение солнечной радиации [3] и кислорода в водную толщу, определяет интенсивность фотосинтеза подо льдом весной [4]. В полной мере это относится и к озеру Ханка, которое представляет собой самый крупный мелководный водоем на Дальнем Востоке. Площадь поверхности воды непостоянна, она меняется в зависимости от климатических условий (максимум достигает 5010 км², а минимум — 3940 км²). Длина озера — около 90 км, наибольшая ширина — 67 км. В озеро Ханка впадает 24 реки, вытекает же только одна — Сунгача, которая соединяет его с Уссури, а та в свою очередь — с Амуром. Озеро Ханка является мелким водоемом со средней глубиной 4,5 м, максимальная глубина (при среднем уровне) составляет 6,5 м [5]. Межгодовые изменения колебания уровня воды в озере Ханка происходят с периодом 24—26 лет [6]. Высшие уровни наблюдаются на Ханке осенью, когда часто отмечаются сгонно-нагонные явления [7].

Усиленное внимание ученых к озеру Ханка в последнее время связано как с увеличением уровня озера, который в 2016 г. достиг максимального значения за весь период наблюдений, так и вследствие усиленного использования озера в рекреационном и рыбопромысловом направлении. Дальнейшее падение уровня озера и интенсификация его использования в рекреационном плане после 2016 г. однозначно будут влиять на гидрохимический режим озера. Экосистема озера слабоустойчива к антропогенным воздействиям, поэтому изменения в экосистеме озера

могут быть вызваны, как климатическими (природными) явлениями, так и антропогенными факторами. Неустойчивое относительное благополучие, наблюдаемое в годы экономического кризиса в России, в бассейне озера может исчезнуть [8].

В связи с этим чрезвычайно актуально для контроля качества воды в озере проводить систематические наблюдения за гидрохимическим составом.

В работах, посвященных гидрологическим и гидрохимическим условиям озера, рассмотрен в основном теплый период года [5, 8—11].

Озеро Ханка относится к эпитеплым озерам, вода в которых в течение всего безледного периода находится в состоянии гомотермии или слабовыраженной прямой стратификации. Летом донные отложения аккумулируют большое количество тепла, за счет которого обеспечивается зимний прогрев придонных слоев воды.

Зимний период — это одна из наиболее сложных фаз в жизни озер. Это время характеризуется наименьшим запасом воды в озере, ухудшением газообмена между атмосферой и водной толщей, а также снижением теплозапаса и уменьшением содержания растворенного кислорода, необходимого для нормальной зимовки гидробионтов. Данное обстоятельство и определило цель работы.

Материал и методика

Начиная с 2016 г., в феврале Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» проводит наблюдения за гидрологическим и гидрохимическим режимами. Сбор гидрологической информации осуществлялся с помощью гидрологического зонда ASTD102-ALC-R02 в автономном режиме. Связь с зондом, выгрузка данных, перевод выходных данных в физические величины осуществлялся с использованием программных пакетов, прилагаемых к зонду. Пробы воды отбирали подо льдом и разливали в полиэтиленовые банки емкостью 0,5 л, транспортировали в холодильных ящиках (при температуре не выше 4 °С) в лабораторию для дальнейших исследований. Аналитическая работа проводилась в лаборатории промышленной океанографии Тихоокеанского филиала ВНИРО. В воде определялось содержание растворенного кислорода, взвешенных веществ, рН и биогенных элементов (фосфаты, силикаты, нитраты, нитриты, аммоний) согласно Руководству [12]. Дополнительно содержание растворенного кислорода определялось при помощи оптического датчика фирмы Rinko, показания которого сравнивались с определением растворенного кислорода методом Винклера. При этом коэффициент детерминации составил 0,916, поэтому для построения графиков вертикального распределения растворенного кислорода за основу брались показания зонда.

В теплое время года работы производились с мотобота [8]. Зимой выполнялся стандартный разрез, расположенный вблизи поселка Камень-Рыболов. Разрез располагался на расстоянии 500—600 м от берега, расстояние между станциями составляло 600—800 м. Общая длина разреза — около 2000 м. Координаты станций определялись при помощи JPS “GARMIN”. Ошибка определения не превышала 8 м. Схема гидрологического разреза показана на рис. 1.

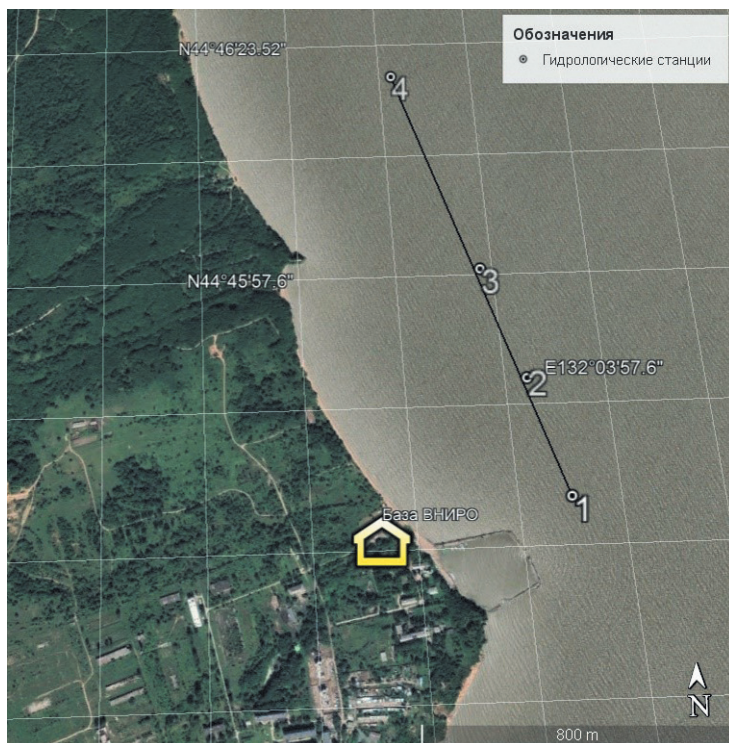


Рис. 1. Схема гидрологического разреза в феврале.

Fig. 1. Scheme of the surveyed area. Hydrological transect is shown in February.

Все работы выполнялись в основном во второй декаде февраля, что позволило исключить сезонную изменчивость. Только в 2016 г. и 2017 г. работы выполнялись еще в декабре. При дальнейшей обработке и построении рисунков и графиков использовались программа Excel, Ocean Data View, Статистика 10.

Результаты

Ледовый режим. Ханка замерзает во второй половине ноября, вскрывается в апреле. Мощность ледяного покрова зависит от суровости зимы. В целом, чем выше температура воздуха в зимние месяцы, тем меньше толщина ледяного покрова. Коэффициент детерминации зависимости мощности ледяного покрова от температуры воздуха составляет $R^2 = 0,90$. Наименьшая толщина льда в феврале за рассматриваемый период наблюдалась в 2019 г. (60 см), а наибольшая — в 2018 г. (100 см). Ветры, дующие в момент охлаждения поверхностного слоя до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, несколько сдвигают сроки замерзания озера.

Температурный режим. Осенью в виду мелководности озера и вследствие вертикального перемешивания температура воды во всем слое практически

одинакова. Так, в октябре температура воды изменяется от 10,41 °С на поверхности до 10,38 °С у дна. С этого момента начинается интенсивное охлаждение водной массы, которая в начале ледостава обладает минимальным теплозапасом. В декабре температура воды с глубиной изменяется от 0,9 °С подо льдом до 1,6 °С у дна. После ледостава интенсивное охлаждение водной массы прекращается, водная масса озера характеризуется максимальным теплозапасом.

Роль сплошного ледового покрова весьма существенна в зимнем режиме водоема, так как теплообмен между водой и атмосферой должен происходить через толщу льда и снега, покрывающего лед [13]. Сразу после образования льда на поверхности озера теплообмен с атмосферой меняется кардинальным образом. Сквозь лед он возможен только посредством молекулярной диффузии тепла из воды в атмосферу. В этих условиях в тепловом балансе озера ведущую роль начинает играть поступление тепла из донных отложений. Водная масса озера начинает достаточно быстро прогреваться, и в феврале температура воды у дна на разрезе составляет 3,5—4,5 °С (рис. 2).

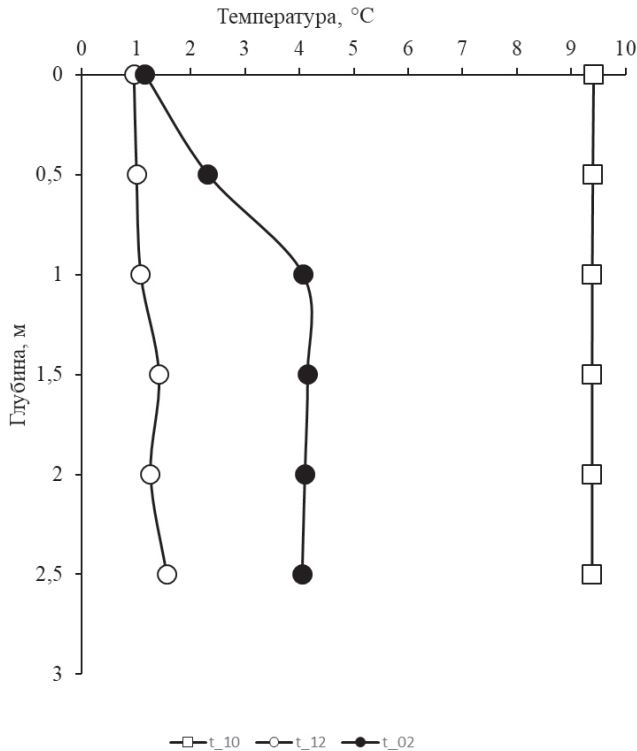


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды на станции №4 в октябре (t₁₀) в декабре 2017 г. (t₁₂) и в феврале 2018 г. (t₀₂).

Fig. 2. Vertical distribution of water temperature at station №4 in October (t₁₀) in December 2017 (t₁₂) and February (t₀₂) 2018.

Накопление тепла донными отложениями происходит в течение весенне-летнего периода. Данные измерений на неглубоких озерах и водохранилищах показывают, что теплозапас их водной толщи и деятельного слоя донных отложений соизмерим. Поток тепла на границе вода — донные отложения играет решающую роль в изменении термической структуры мелководных озер в период ледостава. При наличии сплошного льда на поверхности озера, препятствующего потерям тепла в атмосферу, теплообмен с донными отложениями обуславливает повышение температуры водной толщи озер. Зимой поток тепла направлен из донных отложений в воду [14]. Так, например, после относительно теплого лета 2021 г. температура воды у дна в феврале 2022 г. была на 0,5—1,0 °С выше, чем после относительно холодного 2016 г. При этом рост температуры после теплого лета наблюдался практически сразу подо льдом, после холодного — с 2 метров.

Распределение температуры воды на разрезе в феврале относительно равномерное. Температура воды подо льдом изменялась от +0,2 °С до +1,5 °С, а на глубине 3—3,5 м от 4,0 °С до 4,4 °С. Таким образом, повышение температуры у дна обусловлено прогревом придонных вод за счет отдачи тепла, накопленного грунтом за теплые месяцы. При этом максимальная плотность пресной воды отмечается при температуре 4,0 °С, что препятствует вертикальному обмену.

Растворенный кислород. Важнейшим показателем биохимических процессов является растворенный в воде кислород. Известно, что содержание растворенного кислорода в воде во многом зависит от температуры воды. Чем выше температура, тем ниже содержание растворенного кислорода. Вследствие этого следует ожидать, что при более низких температурах его концентрация должна быть выше. Вместе с тем содержание кислорода в относительно теплом феврале 2022 г. было значительно выше, чем в феврале 2017 г. Содержание растворенного кислорода в 2022 г. изменялось от 13 до 18 мл/л, а в 2017 г. от 11 до 12 мл/л. При этом относительное его содержание в 2022 г. составляло 140—180 %, а в 2017 г. — 110—120 % (рис. 3).

Такая ситуация могла быть обусловлена следующими причинами. Снежный покров в течение зимы (если не успевает слезаться) сильными ветрами северного и северо-западного направления сносится в южную и восточную части озера Ханки, поэтому большая часть льда на акватории водоёма остаётся без снега либо со снежным покровом незначительной толщины. По той же причине из-за высокой прозрачности ледового покрова зимой в озере не прекращается массовое развитие фитопланктона, который выделяет достаточно кислорода для насыщения воды.

За весь период наших исследований относительное содержание растворенного кислорода в феврале подо льдом не опускалось ниже 120 %, а во всем слое было выше 100 % (рис. 4). Только в 2020 г. относительное содержание растворенного кислорода на разрезе в толще вод от поверхности до дна было близко к 100 %. Биохимическое потребление кислорода (БПК₂) в рассматриваемые годы подо льдом было достаточно высоким и изменялось от 4,6 до 5,8 мл/л. Такая ситуация могла быть обусловлена, с одной стороны, разложением достаточно большого количества органического вещества, образованного при фотосинтезе и находящегося в исследуемом районе, а с другой — окислением органики, поступающей в воду с бытовыми отходами.

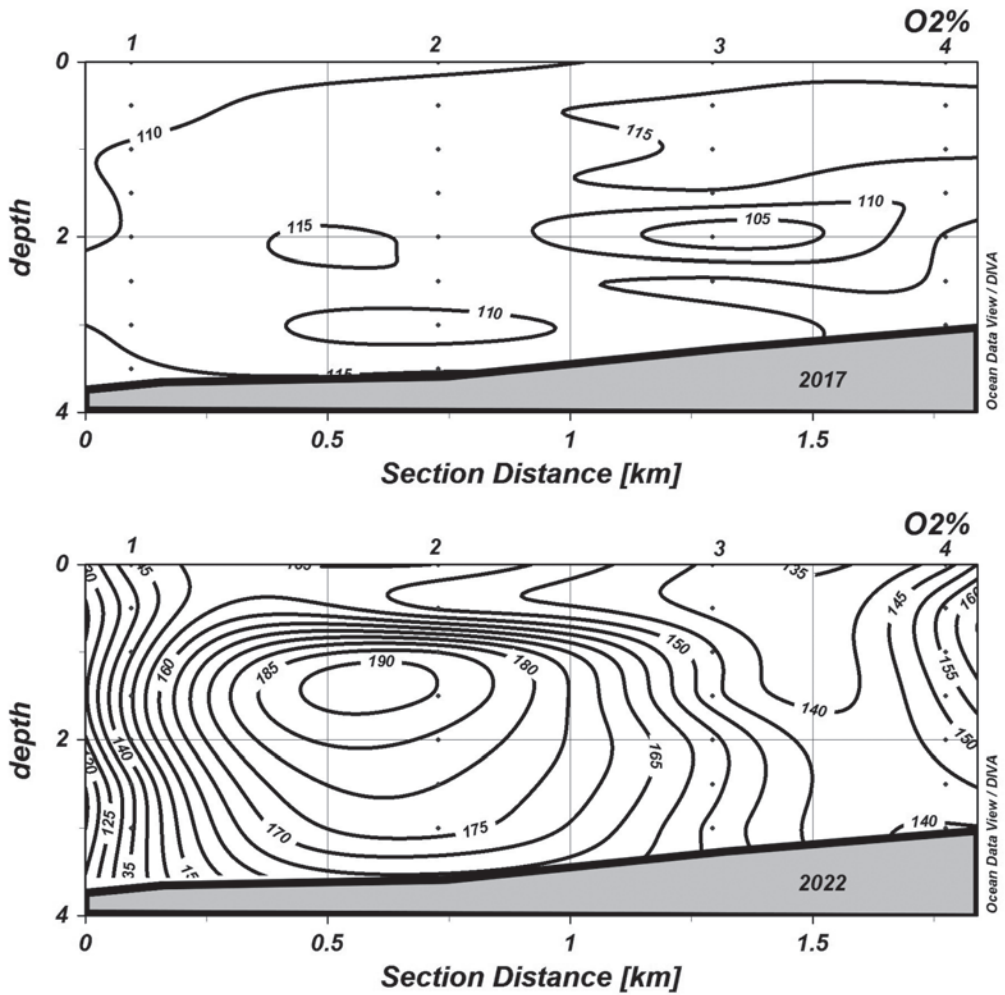


Рис. 3. Распределение относительного содержания растворенного кислорода (%) в феврале на разрезе в 2017 г. и 2022 г.

Fig. 3. Distribution of relative dissolved oxygen content (%) in February at transect in 2017 and 2022.

Поскольку озеро полностью покрыто льдом, который препятствует поступлению кислорода из атмосферы, то высокое относительное содержание в воде может быть обусловлено только фотосинтезом.

Подобные продукционные процессы в зимние месяцы наблюдаются и в многочисленных забайкальских озерах, где фитопланктон подо льдом активно развивается и образует зимние максимумы особенно в малоснежные зимы. Исследования забайкальских озер показывают, что развитие водорослей подо льдом зависит от интенсивности инсоляции и наличия питательных веществ [15].

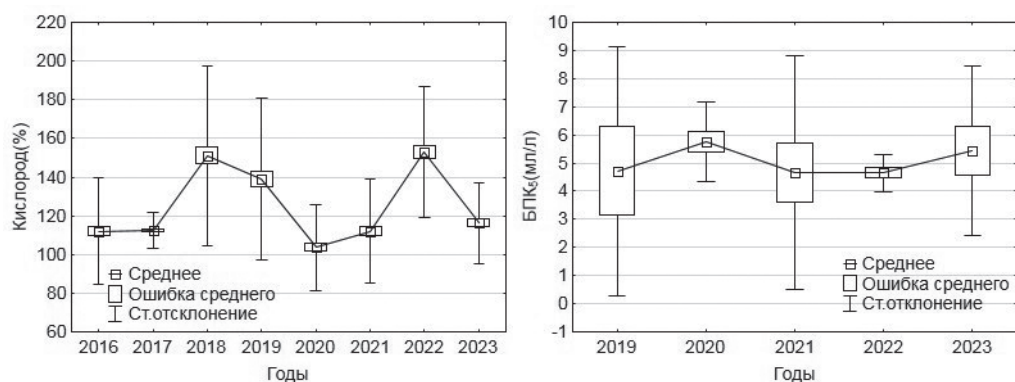


Рис. 4. Изменение среднего на разрезе относительного содержания растворенного кислорода (слева) и БПК₅ (справа) в феврале.

Fig.4. Dynamics of relative content of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand under the ice in February.

Таким образом, вследствие высокой прозрачности ледового покрова в озере зимой не прекращается массовое развитие фитопланктона, и заморные явления из-за недостатка кислорода отмечаются крайне редко.

Заморные явления иногда отмечаются лишь в южной части озера Ханка, где из-за большого количества снега не всегда наблюдается цветение планктонных водорослей [16].

Биогенные вещества. Одной из главных проблем состояния вод озера является загрязнение биогенными веществами. Концентрации биогенных элементов азота и фосфора характеризуют трофность водоема. Наиболее сильно воды озера были загрязнены биогенными веществами в период с 1986 г. по 1989 г. В последующие 10 лет в результате уменьшения антропогенного воздействия и природно-обусловленного роста водности озера наметилась тенденция к снижению уровня его загрязнения, в том числе по содержанию биогенных веществ [9]. Исследования, проведенные в 1991 г. — 1993 г., показали, что по величине химического потребления кислорода класс воды изменяется от «предельно чистых» до «грязных» [8].

С 2015 г. на берегах озера Ханка впервые в практике России начали раздаваться бесплатные гектары, которые используются для строительства и расширения баз отдыха, развития сельского хозяйства и животноводства. Это обстоятельство во многом может повлиять на трофность озера. Как отмечалось на II Всероссийской конференции с международным участием «Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития», неочищенные сточные воды промышленных и сельскохозяйственных предприятий являются ведущим антропогенным фактором, влияющим на экологическую обстановку в бассейне озера Ханка. Особую угрозу биоте данной территории и проживающему здесь населению составляют сбросы воды с участков рисосеяния.

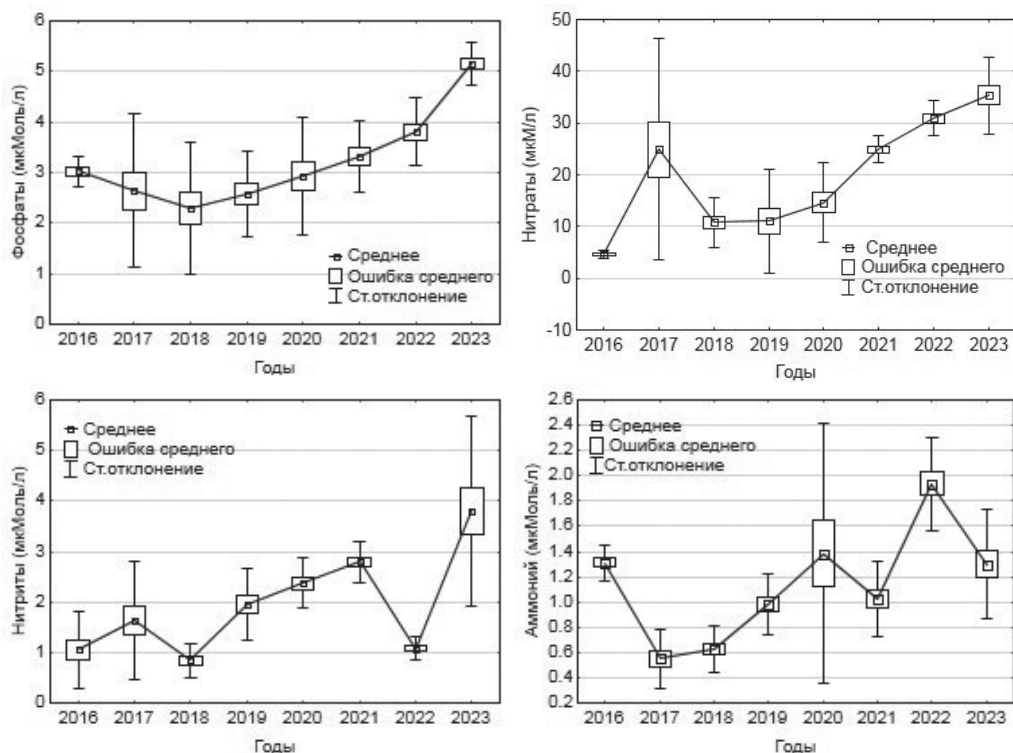


Рис. 5. Изменение среднего на разрезе относительного содержания фосфатов, нитратов, нитритов и аммония в феврале подо льдом.

Fig. 5. Dynamics phosphates, of nitrate, of nitrite and ammonium nitrogen concentration in February under ice.

Так, в последние годы отмечается рост фосфатов и нитратов (рис. 5). Уровень концентрации фосфатов в феврале с 2016 г. по 2023 г. увеличился почти в 3 раза, а уровень концентрации нитратов — в 5 раз.

Значительное количество загрязняющих веществ (аммоний, нитриты, фосфаты и др.) смывается с сельскохозяйственных территорий. В основном стоки, которые содержат высокую концентрацию органических веществ, биогенных элементов и других поллютантов, попадают в водоемы и водостоки без какой-либо очистки. Поступление в водоемы значительного количества биогенных веществ (азота, фосфора и других элементов в составе удобрений, отходов животноводства и т.д.) приводит к резкому возрастанию биомассы фитопланктона.

Известно, что аммоний является как первичным продуктом обмена веществ, так и последней стадией полной минерализации органических остатков. Нитриты образуются в результате окисления солей аммония, поэтому высокие их концентрации обнаруживаются в местах значительного скопления отмерших организмов.

Изменения аммония и нитритов в межгодовом аспекте не так значительны, как изменения фосфатов и нитратов, тем не менее, можно заметить рост их концентраций зимой в воде после 2017 г. (рис. 5).

Заключение

В целом, говорить о межгодовых изменениях за столь короткий промежуток не совсем корректно. В лучшем случае можно отметить тенденции, которые наблюдались в течение последних восьми лет. Тем не менее, проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

— Повышение температуры у дна обусловлено прогревом придонных вод за счет отдачи тепла, накопленного грунтом за теплые месяцы. При этом максимальная плотность пресной воды отмечается при температуре 4°C, что препятствует вертикальному обмену.

— Высокие концентрации растворенного кислорода и высокие значения БПК₅ в зимний период свидетельствуют о том, что подо льдом происходит активное цветение фитопланктона.

— Падение уровня озера и интенсивное его использование в рекреационном направлении после раздачи бесплатных гектаров приводит к росту содержания биогенных веществ, в частности, неорганических форм фосфора и азота.

— Поступление в водоемы значительного количества биогенных веществ (азота, фосфора и других элементов в составе удобрений, отходов животноводства, и т.д.) приводит к резкому возрастанию биомассы фитопланктона.

Высокие значения биохимического потребления кислорода (БПК₅) под льдом, с одной стороны, свидетельствуют о разложении достаточно большого количества органического вещества, образованного при фотосинтезе и находящегося в исследуемом районе, а с другой — об окислении органики, поступающей в воду с бытовыми отходами.

Список литературы

1. Здоровеннова Г. Э. Термическая структура мелководного озера в период ледостава: внутрисезонная и межгодовая изменчивость / Автореф. дис. канд. геогр. наук. Санкт-Петербург. 2007. 30 с.
2. Лобанов В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В., Семенова Д. А. Влияние изменения климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 435—452. Doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452.
3. Андреев О. М., Иванов Б. В. Параметризация переноса коротковолновой солнечной радиации в снежно-ледяном покрове // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 54—58.
4. Вологдин М. П. Гидрооптические особенности малых озер Забайкалья (на примере Ивано-Арахлейских). Новосибирск: Наука, 1981. 136 с.
5. Васильковский М. Г. Гидрологический режим озера Ханка. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 176 с.
6. Зуенко Ю. И., Шаповалов М. Е., Курносова А. С. Современные изменения уровня озера Ханка и их последствия для промысловых ресурсов // Известия ТИНРО. 2020. Т. 200. Вып. 4. С. 935—950. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.
7. Ананьева Е. Е. Озеро Ханка: Колебания уровня и их причины // Астраханский вестник экологического образования. 2016. №4 (38). С. 48—57.
8. Семькина Г. И. Обзор состояния и загрязнения озера Ханка по материалам государственной сети наблюдений за загрязнением окружающей среды / Труды 2-ой Международной

- конференции проблемы сохранения водно-болотных угодий международного значения: озеро Ханка. Спасск-Дальний. 2006. С.190—201.
9. Апонасенко А. Д., Лопатин В. Н., Щур Л.А., Филимонов В. С. Оценка экологической ситуации и качества воды дальневосточного озера Ханка оптическими методами // Гидробиологический журнал. 1997. Т. 33, № 5. С. 54—63.
 10. Молокоедова Е. А. Экологическое состояние озера Ханка [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://primpogoda.ru/news/ecology/ekologicheskoe_sostoyanie_ozera_hanka (дата обращения 03.02.2022).
 11. Матвеев В. И., Курносова А. С., Катайкина О. И. Результаты гидрохимического мониторинга озера Ханка в 2016–2018 годах // Тихоокеанская география. 2020. № 3. С. 47—55. DOI: 10.35735/tig.2020.91.80.005.
 12. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана // М.: ВНИРО, 2003. 201 с.
 13. Белдеубаев Е. Е., Сальников В. Г. О сроках установления и разрушения ледяного покрова на озере Балхаш в современных климатических условиях // Гидрометеорология и экология. 2021. № 1. С. 6—16. DOI:10.54668/2789-6323-2021-100-1-6-16.
 14. Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Пальшин Н. И. и др. Изменение теплопотока на границе вода-донные отложения в малом озере в течение года // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Том 6 (16). Вып. 4. С.116—128. DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-116-128.
 15. Ривьер И. К. Особенности планктоценозов озер в разные экологические периоды (подледный и открытой воды) // Труды ИБВВ РАН. 2016. Вып. 74(77). С. 59—76.
 16. Барабанщиков Е.И., Кожевников Б.П. Динамика численности и биомассы зоопланктона открытой части озера Ханка // Известия ТИНРО. 1998. Т. 123. С. 362—374.

References

1. Zdrovennova G. E. *Termicheskaya struktura melkovodnogo ozera v period ledostava: vntrisezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost'* = *Thermal structure of a shallow lake in the period of ice age: intra-seasonal and inter-annual variability*. Avtoref. dis. kand. geogr. nauk. St. Petersburg, 2007: 30 p. (In Russ.).
2. Lobanov V. A., Goroshkova N. I., Strizhenok A. V., Semenova D. A. Influence of climate change on extreme hydrological characteristics in the Pechora River basin. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2022; (68): (435—452). (In Russ.) Doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452.
3. Andreev O. M, Ivanov B. V. Parametrization of short-wave solar radiation transfer in snow and ice cover. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2003; (2): (54—58). (In Russ.).
4. Vologdin M. P. *Gidroopticheskie osobennosti malyh ozer Zabajkal'ya (na primere Ivano-Arahlejskih = Hydro-optical features of small lakes of Transbaikalia (on the example of Ivano-Arakhlei)*. Novosibirsk: Nauka, 1981: 136 p. (In Russ.).
5. Vaskovsky M. G. *Gidrologicheskij rezhim oz. Hanka = Hydrological regime of the lake*. Khanka. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 176 p. (In Russ.).
6. Zuenko Yu. I. Shapovalov M. E., Kursova A. S. Modern changes in the level of Lake Khanka and their consequences for commercial resources. *Izvestiya TINRO = News of TINRO*. 2020; 200(4): (935—950). (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.
7. Anan'eva E. E. Lake Khanka: Level fluctuations and their causes. *Astrahanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya = Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2016; 38(4): (48—57). (In Russ.).
8. Semykina G. I. Overview of the state and pollution of Lake Khanka based on the materials of the State Network of Environmental Pollution Observations. *Trudy 2-oi Mezhdunarodnoj konferencii problemy sohraneniya vodno-bolotnyh ugodij mezhdunarodnogo znacheniya: ozero Khanka = Proceedings of the 2nd International Conference on the Conservation of Wetlands of International Importance: Lake Khanka*. 2006: (190—201). (In Russ.).
9. Aponasenko A. D., Lopatin V. N., SHCHur L. A., Filimonov V. S. Assessment of the ecological situation and water quality of the Far Eastern Lake Khanka by optical methods. *Gidrobiologicheskij zhurnal = Hydrobiological Journal*. 1997; 33(5): (54—63). (In Russ.).

10. Molokoedova E. A. Ekologicheskoe sostoyanie ozera Khanka. Available at: https://prim Pogoda.ru/news/ecology/ekologicheskoe_sostoyanie_ozera_hanka (accessed on: 3.02.2022).
11. Matveev V. I., Kurnosova A. S., Kataykina O. I. Results of hydrochemical monitoring of Lake Khanka in 2016-2018. *Tihookeanskaya geografiya = Pacific Geography*. 2020; (3): (47—55). (In Russ.). DOI: 10.35735/tig.2020.91.80.005.
12. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybohozyajstvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla rajonov Mirovogo okeana = Guidelines for Chemical Analysis of Marine and Fresh Waters during Environmental Monitoring of Fishery Reservoirs and Areas of the World Ocean Promising for Fishing*. Moscow: VNIRO, 2003: 201 p. (In Russ.).
13. Beldeubaev E. E., Sal'nikov V. G. On the timing of the establishment and destruction of the ice cover on Lake Balkhash in modern climatic conditions. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021; (1): (6—16). (In Russ.). DOI:10.54668/2789-6323-2021-100-1-6-16.
14. Zdorovenova G. E., Gavrilenko G. G., Pal'shin N. I. and etc. Change in heat flow at the water-bottom sediment boundary in the small lake during the year. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov = Geopolitics and ecogeodynamics of regions*. 2020; 16(6): (116—128). (In Russ.). DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-116-128.
15. Riv'er I. K. Features of planktocenoses of lakes in different ecological periods (subglacial and open water). *Trudy IBVV RAN = Proceedings of the Institute of Internal Water Biology*. 2016; 74 (77): (59—76). (In Russ.).
16. Barabanshchikov E. I., Kozhevnikov B. P. Dynamics of the number and biomass of zooplankton in the open part of the lake Khanka. *Izvestiya TINRO = News of TINRO*. 1998; (123): (362—374). (In Russ.).

Сведения об авторах

Ольга Игоревна Катайкина, Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии, Тихоокеанский филиал, специалист лаборатории промысловой океанографии, olga.kataykina@tinro.ru.

Владимир Иванович Матвеев, кандидат географических наук, Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии, Тихоокеанский филиал, заведующий сектором мониторинга среды.

Александр Леонидович Фигуркин, кандидат географических наук, Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии, Тихоокеанский филиал, заведующий сектором океанографии.

Information about authors

Olga Igorevna Kataykina, Specialist of the fishery oceanography Laboratory, Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO, Pacific branch of VNIRO, olga.kataykina@tinro.ru.

Vladimir Ivanovich Matveev, Ph.D. in Geography, Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO, Pacific branch of VNIRO, head of the environmental monitoring sector.

Alexander Leonidovich Figurkin, Ph.D. in Geography, Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO, Pacific branch of VNIRO, head of the Oceanography Sector.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.04.2023

Принята к печати после доработки 22.11.2023

The article was received on 14.04.2023

The article was accepted after revision on 22.11.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 711—724.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):711—724.

Научная статья

УДК [556.55:574.5](470.55/.58)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-711-724

Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа

Александр Генрихович Рогозин

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения РАН, Миасс, Россия, rogozin57@gmail.com

Аннотация. Проведена классификация 19 водоемов Южного Урала на основе биопродукционно-гидрохимических данных методами многомерной статистики. Среди 17 озер и 2 водохранилищ выделены группы олиготрофных (Аракуль, Большой Еланчик, Еловое, Иткуль, Тургояк, Увильды и Ирмельское водохранилище), мезотрофных (Большой Ишкуль, Большой Кисегач, Большое Миассово, Ильменское, Карматкуль, Сириткуль, Сугояк и Аргазинское водохранилище) и эвтрофных (Большой Таткуль, Малый Теренкуль, Смолино, Табанкуль) водоемов. Многие из них имеют переходный трофический статус. Для классификации южноуральских водоемов по продуктивности наибольшее значение имеют вещества азотной группы, а среди них — содержание в воде нитритов.

Ключевые слова: озера, водохранилища, Южный Урал, трофический статус, биогенные вещества, классификация, многомерная статистика.

Благодарности: работа проведена при поддержке госзадания Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии Уральского отделения РАН (тема АА-А-А19-119101490003-1). Автор благодарен коллегам за существенную помощь – Гаврилкиной С. В. за организацию сбора и анализа гидрохимических проб, Щетининой О. В. за участие в статистической обработке материала.

Для цитирования: Рогозин А. Г. Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 711—724. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-711-724.

Original article

Trophic Classification of the South Ural water bodies by multivariate statistics

Alexander G. Rogozin

South Ural Scientific Centre Mineralogy and Environmental Geology of the Ural branch
Russian Academy of Sciences, Miass, Russia, rogozin57@gmail.com

Summary. The widespread and increasing anthropogenic eutrophication, as well as climate change, affects the productivity of water bodies. This makes knowledge of the trophic status of as many water bodies

as possible in different natural and climatic zones of Russia more and more relevant. Our main problem was to classify 19 most important reservoirs of the Southern Urals by trophic state on the basis of hydrochemical and hydrophysical data. Classifying by traditional methods on the base of summary indicators may be incorrect due to significant seasonal, spatial and long-term fluctuations in the values of the main studied data in all studied reservoirs.

The following indicators were used to classify water bodies: the content of substances of the nitrogen group (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), orthophosphates (HPO_4^{2-}), total phosphorus (P_{tot}), as well as color ($^{\circ}\text{Pt-Co}$) and permanganate oxidizability (PO). Between 2002 and 2019 19 water bodies of the Southern Urals were studied (lakes and reservoirs).

For the correct processing of a large data array and the exclusion of a subjective factor in identifying the trophic status, it was decided to process the data array using the methods of multivariate statistics. Using cluster analysis based on a data array, 3 clusters were identified among 19 reservoirs of the Southern Urals. This result was also confirmed by multidimensional scaling. By using correspondence analysis, these clusters were explained as trophic states of water bodies (oligo-, meso- and eutrophic).

The oligotrophic class includes lakes Arakul, Bolshoi Elanchik, Spruce, Itkul, Turgoyak, Uvildy and the Iremel reservoir, mesotrophic — lakes Bolshoy Ishkul, Bolshoy Kisegach, Bolshoye Miassovo, Ilmenskoye, Karmatkul, Siritkul, Sugoyak and Argazinskoye reservoir, eutrophic — Bolshoi Tatkul, Maly Terenkul, Smolino, Tabankul. Some water bodies have a transitional trophic state.

Among the main hydrochemical indicators, the substances of the nitrogen group are of the greatest importance for the trophic classification of the South Ural water bodies, and among them the content of nitrites in the water.

Keywords: lakes, reservoirs, Southern Urals, trophic state, organic substances, classification, multivariate statistics.

Acknowledgments. The work was carried out with the support of the state assignment of the South Ural Scientific Centre Mineralogy and Environmental Geology of the Ural branch Russian Academy of Sciences (theme AAA-A19-119101490003-1). The author is grateful to colleagues for their valuable help — to Gavrilkina S. V. for organization of collection and analysis of hydrochemical samples, to Schetina O. V. for participation in the statistical processing of the material.

For citation: Rogozin A. G. Trophic Classification of the South Ural water bodies by multivariate statistics. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):711—724. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-711-724.

Введение

Классификация озер и озеровидных водоемов по биологической продуктивности предложена в основополагающих трудах Э. Науманна и А. Тинеманна [1, 2, 3]. Эта типология была основана на связи комплекса абиотических факторов среды (прозрачность, цветность, содержание биогенных веществ и др.) с продуктивностью (трофическим типом) водоема. В дальнейшем она получила развитие в многочисленных работах последователей, значительно дополнивших и усовершенствовавших первоначальную классификацию [4, 5, 6—13]. Большую популярность приобрели классификационные шкалы, основанные на интегральных показателях, таких как прозрачность воды [10], концентрация хлорофилла *a* [14] и др. Трофическая классификация была также встроена в общую систему оценки качества вод [15].

В связи с повсеместным распространением и нарастающим ускорением антропогенного эвтрофирования [16], а также серьезными климатическими сдвигами, влияющими на уровень продуктивности водоемов, становится все более актуальным знание о трофическом статусе как можно большего числа озер и озеровидных водоемов в разных природно-климатических зонах России. Южный Урал — один

из наиболее «озерных» регионов страны [17], и здесь названная проблема стоит очень остро. В частности это касается большого количества озер — памятников природы, рекреационных водоемов, водохранилищ — источников водоснабжения крупных промышленных центров. Казалось бы, вопрос трофической типологии в настоящее время прекрасно разработан, однако ни одна из систем классификации не дает точной и, главное, устойчивой оценки трофности. Трудности создает также их практическое применение.

Использование интегральных показателей (TSI Карлсона и его аналоги) не всегда приемлемо: например, содержание хлорофилла *a* и прозрачность характеризуют трофический статус эпилимниона и не отражают ситуацию в водоеме в целом, и в ряде случаев могут давать неправильные оценки [4]. Данные по биомассе и составу планктона достаточно показательны, но требуют наличия подготовленного специалиста-альголога, что далеко не всегда и везде возможно.

Несмотря на многочисленность различных подходов к оценке трофического статуса следует признать, что содержание биогенных веществ является одним из наиболее надежных критериев [4, 18], поскольку изначально определяет продуктивность водоема, в то время как остальные показатели (концентрация кислорода, биомасса фитопланктона, окисляемость и пр.) — производные от ситуации, создаваемой биогенной нагрузкой. Кроме того, наиболее обширные данные, полученные при самых стандартных и рутинных наблюдениях на озерах, — это именно анализы содержания биогенных веществ. Однако существует большая трудность определения трофического статуса водоемов по концентрации биогенов, связанная со значительной сезонной, локальной и зонально-климатической вариабельностью их содержания. Например, в загрязненных водоемах содержание азотных форм может падать до аналитического нуля при избытке фосфора и массовом развитии фитопланктона [19, 20], тогда как в чистых олиготрофных водах их концентрация в это же время может быть выше.

При обработке больших массивов данных для большого числа водоемов целесообразно использовать методы многомерной статистики, позволяющие не только избежать путаницы с определением статуса того или иного водоема, но и выявить ключевые показатели эвтрофирования, наиболее информативные в изучаемом регионе. Кроме того, эти методы позволяют избежать привнесения некоторой субъективности исследователя и выявить латентные факторы, влияющие на отнесение объекта классификации к той или иной категории. Например, одному и тому же озеру в зависимости от сезона, специфики конкретного года наблюдений и даже от места отбора проб нередко можно дать различные оценки трофического статуса. Попадание изучаемого водоема наряду с другими в определенную классификационную группу будет означать, что, несмотря на флуктуации показателей, его истинный трофический статус установлен.

Цель данного исследования — классификация по содержанию биогенных веществ и некоторым дополнительным показателям 17-ти озер и 2-х водохранилищ Южного Урала, расположенных в границах Челябинской области, методами многомерного статистического анализа (МСА).

Методика исследования

Для классификации водоемов были использованы следующие показатели: содержание в воде веществ азотной группы (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), ортофосфатов (HPO_4^{2-}), общего фосфора ($\text{P}_{\text{общ}}$), а также цветность (Pt-Co) и перманганатная окисляемость (ПО). В период с 2002 г. по 2019 г. были обследованы 19 водоемов Южного Урала (рис. 1), в которых стандартными методами отобраны пробы указанных

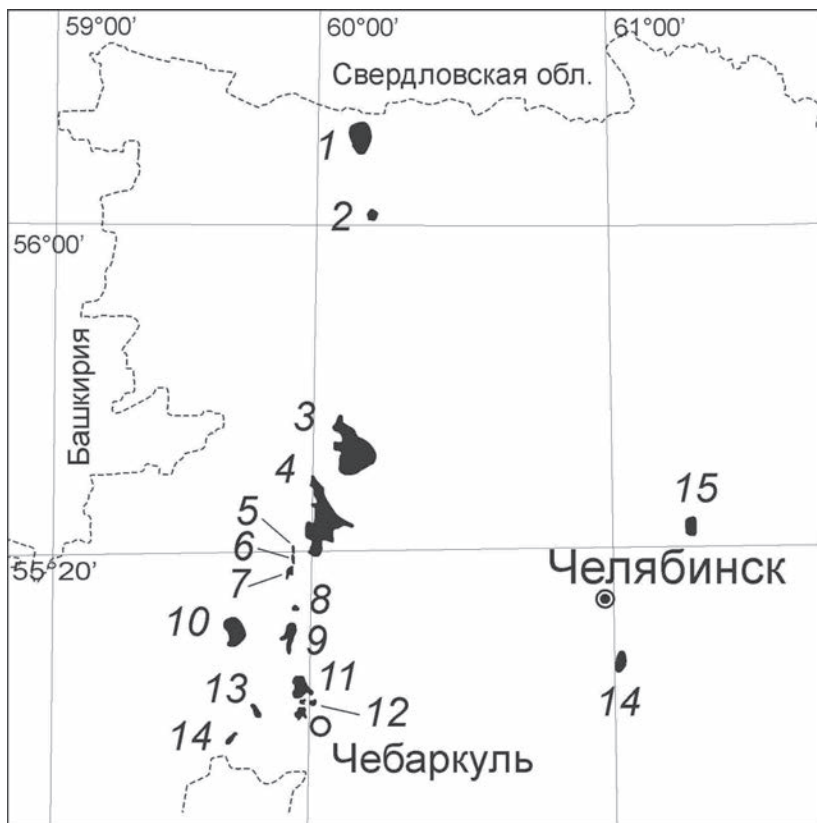


Рис. 1. Карта-схема исследованных водоемов на Южном Урале (север Челябинской области).

Условные обозначения: 1 — Иткуль, 2 — Аракуль, 3 — Увильды, 4 — Аргазинское водохранилище, 5 — Карматкуль, 6 — Сириткуль, 7 — Большой Ишкуль, 8 — Большой Таткуль, 9 — Большое Миассово, 10 — Тургойак, 11 — Большой Кисегач, 12 — Еловое, Малый Теренкуль, Табанкуль, 13 — Ильменское, 14 — Иремельское водохранилище, 15 — Сугойак, 16 — Смолино.

Fig. 1. Map-scheme of the investigated reservoirs in the Southern Urals (north of the Chelyabinsk region).

Symbols: 1 — Itkul, 2 — Arakul, 3 — Uvildy, 4 — Argazinskoye reservoir, 5 — Karmatkul, 6 — Siritkul, 7 — Big Ishkul, 8 — Big Tatkul, 9 — Big Miassovo, 10 — Turgoyak, 11 — Big Kisegach, 12 — Elovoye, Maly Terenkul, Tabankul, 13 — Ilmenskoye, 14 — Iremelskoye reservoir, 15 — Sugoyak, 16 — Smolino.

характеристик. Гидрохимические анализы выполнены в лаборатории Центра коллективного пользования ИГЗ–ИМин УрО РАН (г. Миасс) общепринятыми методами. Исследованные водоемы представляют все основные ландшафтно-климатические и лимнологические зоны Южного Урала (от горно-лесного ландшафта до лесостепи) и демонстрируют разный спектр антропогенной нагрузки: от охраняемых на территории Ильменского государственного заповедника (Большой Ишкуль, Большое Миассово, Сириткуль и др.) и памятников природы (Еловое, Большой Кисегач, Тургояк и др.) до полностью урбанизированных в черте г. Челябинск и его окрестностях (Смолино, Сугояк), служащих в качестве приемников сточных вод (Малый Теренкуль, Табанкуль) или источников водоснабжения городов (водохранилища Аргазинское, Ирмельское). Некоторые из этих озер и водохранилищ сравнительно неплохо изучены, а итоги работ опубликованы [19–26]. Общий объем материала составил 1017 проб, число повторных измерений по разным водоемам колеблется от 3 до 9.

Для нормирования исходного массива статистически разнородных данных и стандартизации в единых терминах разрядов трофности на основе известной шкалы [15] была дана балльная оценка содержанию в пробе каждого гидрохимического показателя, а затем выведен средний балл по каждому из них, соответствующий одной из трофических категорий (табл. 1).

Классификация многих водоемов по трофическому типу может вызвать затруднения из-за существенного разброса оценок по отдельным показателям. В данном случае применены три метода многомерной статистики — кластерный анализ, многомерное шкалирование и анализ соответствий. С помощью первых двух была предпринята попытка найти значимые статистические неоднородности в массиве данных и с их помощью выделить устойчивые сочетания показателей, объединяющих классифицируемые объекты (водоемы) в группы. Третий метод (анализ соответствий) служит для интерпретации выделенных групп и выявления наиболее существенных факторов, определяющих результаты кластеризации [27]. Для технической реализации данных методов было использовано свободно распространяемое программное обеспечение PAST 3.05.

Таблица 1

Усредненная балльная оценка гидрохимических показателей
в озерах и водохранилищах Южного Урала по [15]

The average score of hydrochemical indicators in lakes and reservoirs
of the Southern Urals according to [15]

Водоем	Балльная оценка показателей						
	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	HPO_4^{2-}	$\text{P}_{\text{общ}}$	$^{\circ}\text{Pt-Co}$	ПО
Аракуль	3	3	1	1	2	2	3
Аргазинское	3	4	5	6	5	4	2
Б. Еланчик	4	3	2	2	3	4	4
Б. Ишкуль	3	3	3	4	4	3	2
Б. Кисегач	3	3	2	2	4	3	5
Б. Миассово	3	3	3	2	4	4	5
Б. Таткуль	4	5	4	3	4	6	7

Водоем	Бальная оценка показателей						
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	НРО ₄ ²⁻	P _{общ}	°Pt-Co	ПО
Еловое	2	2	2	2	3	2	3
Ильменское	3	4	4	3	4	5	6
Ирмельское	5	3	5	2	4	4	3
Иткуль	3	3	1	2	3	2	2
Карматкуль	3	4	5	2	4	5	5
М. Теренкуль	4	5	3	8	8	5	6
Сириткуль	3	4	4	3	5	5	5
Смолино	3	5	4	3	4	2	3
Сугояк	3	4	3	2	4	2	4
Табанкуль	5	5	4	9	9	8	9
Тургояк	1	2	2	2	2	1	2
Увильды	3	3	3	3	3	2	1

Результаты исследований

Таблица 1 послужила матрицей исходных данных для кластерного анализа и многомерного шкалирования. Первоначальной задачей было выявить, образуют ли водоемы какие-либо компактные группировки по исследуемым показателям. Для этой цели применен кластерный анализ с построением иерархического классификационного дерева. Использован алгоритм кластеризации методом Варда, поскольку он дает хорошие результаты при работе с перекрывающимися кластерами. В качестве метрики использован процент несогласия, широко применяемый в психологии, социологии, археологии, генетике и других областях для работы

с категориальными данными: $\rho(X^{(i)}, Y^{(i)}) = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^k I[X_s^{(i)} \neq Y_s^{(i)}]$, где $X^{(i)}$ и $Y^{(i)}$ — сравни-

ваемые значения признака, k — количество сравниваемых значений, I — количество несовпадающих значений признака [28].

Итоги кластерного анализа показаны на рис. 2. Анализ расстояний пошагового объединения объектов в кластеры показывает, что иерархическое дерево следует «обрезать» на уровне 3-х кластеров. В итоге были получены следующие три группы водоемов, объединенных по величине гидрохимических и гидрофизических показателей (ГП):

1. Тургояк, Еловое, Большой Еланчик, Иткуль, Аракуль, Увильды, Ирмельское водохранилище;

2. Большое Миассово, Большой Кисегач, Большой Ишкуль, Карматкуль, Сириткуль, Сугояк, Ильменское озеро, Аргазинское водохранилище;

3. Большой Таткуль, Табанкуль, Смолино, Малый Теренкуль.

Для исследования полученной классификационной структуры и выявления латентных факторов, определяющих сходство водоемов по ГП, был применен анализ соответствий (АС) и многомерное шкалирование (МШ).

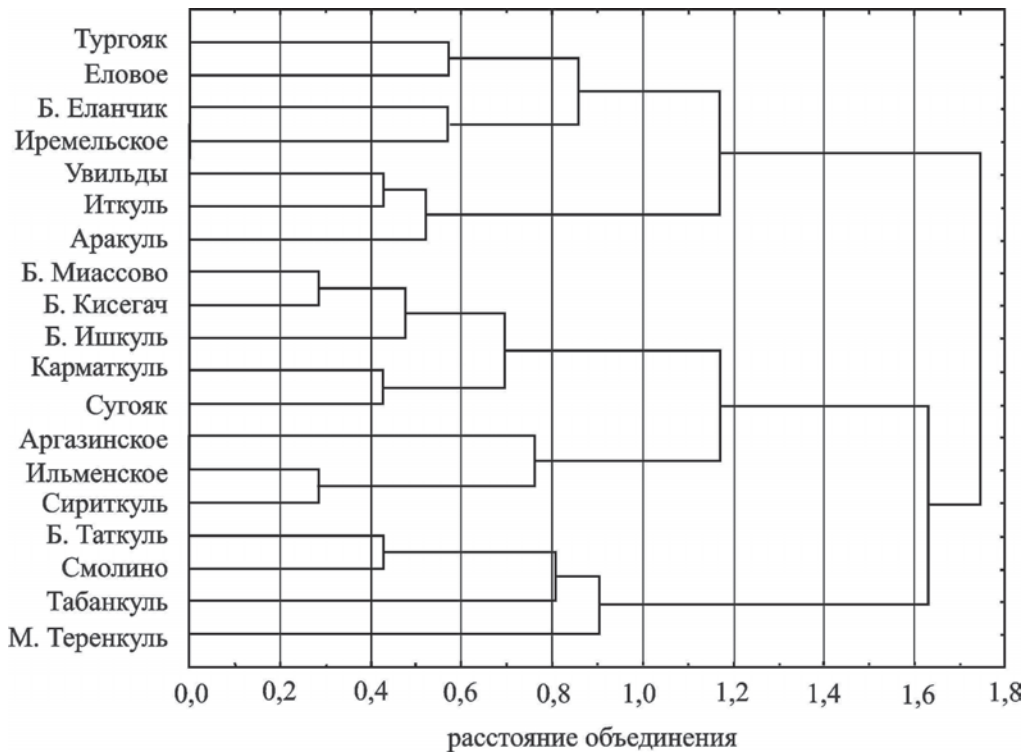


Рис. 2. Дендрограмма результатов иерархического кластерного анализа данных табл. 2.

Fig. 2. Dendrogram of the results of the hierarchical cluster analysis of table 2.

Для того, чтобы понять, какие факторы приводят к наблюдаемой структуре, был использован простой корреспондентный анализ соответствий (simple correspondence analysis), в котором данные не подгоняются под какие-либо статистические модели, а заменяются интерпретацией их графического представления [27]. В данном случае нас интересует интерпретация результатов кластерного анализа, а именно: причины разделения озер на три основных кластера. Для этого отдельные диапазоны ГП были условно обозначены согласно шкале [15]: олиготрофные — О, мезотрофные — М, эвтрофные — Э (табл. 2). Таким образом, если бы какая-то группа водоемов при дальнейшем анализе попала в область «олиготрофных» признаков, это бы означало, что их можно определить как олиготрофные и т.д. Для трех выявленных кластеров (групп водоемов) была составлена карта соответствий — таблица абсолютных частот балльных оценок ГП, основанная на упомянутой шкале трофности. Например (табл. 2), для олиготрофных водоемов наблюдается диапазон содержания аммонийного азота от 0 до 0,1 мг/дм³, который встретился два раза в группе 1 и ни разу в группах 2 и 3. Содержание ионов аммония (0,1—0,3), характерное для класса мезотрофных водоемов, наблюдалось в 4, 8 и 3-х озерах из кластеров с теми же номерами.

Полученная таблица сопряженности была обработана методом простого АС. Найденное графическое решение представлено на рис. 3. Поскольку два измерения объясняют 100% инерции, двумерное решение является исчерпывающим. Рассмотрим распределение трех групп водоемов в пространстве ГП, предварительно интерпретировав оси.

Таблица 2

Таблица абсолютных частот признаков (балльные оценки содержания ГП)
в 3 группах водоемов, выделенных кластерным анализом
Table of absolute frequencies of features (scores by hydrochemical data)
in 3 groups of water bodies identified by cluster analysis

Показатель / группа	Уровень содержания		
	олиготрофный	мезотрофный	эвтрофный
аммоний / 1	2	4	1
нитриты / 1	2	5	0
нитраты / 1	5	1	1
ортофосфаты / 1	6	1	0
общий фосфор / 1	2	5	0
цветность / 1	3	4	0
окисляемость / 1	3	4	0
аммоний / 2	0	8	0
нитриты / 2	0	8	0
нитраты / 2	0	5	2
ортофосфаты / 2	4	3	1
общий фосфор / 2	0	6	2
цветность / 2	1	4	3
окисляемость / 2	2	1	5
аммоний / 3	0	3	1
нитриты / 3	0	0	4
нитраты / 3	0	4	0
ортофосфаты / 3	0	2	2
общий фосфор / 3	0	2	2
цветность / 3	1	0	3
окисляемость / 3	0	1	3

Из табл. 2 видно, что мы имеем 21 значение семи признаков (ГП, табл. 1). Следовательно, для интерпретации осей целесообразно рассматривать точки значений признаков, абсолютный вклад которых в инерцию не менее $1/21 = 0,048$. Для оси 1 (рис. 3), объясняющей основную долю инерции (73,3%), наибольший вклад в инерцию оси дают точки:

— отрицательное направление

нитраты О, фосфаты О, нитриты О, аммоний О;

— положительное направление

нитриты Э, цветность Э, ПОЭ, нитраты М, фосфаты Э, фосфор Э.

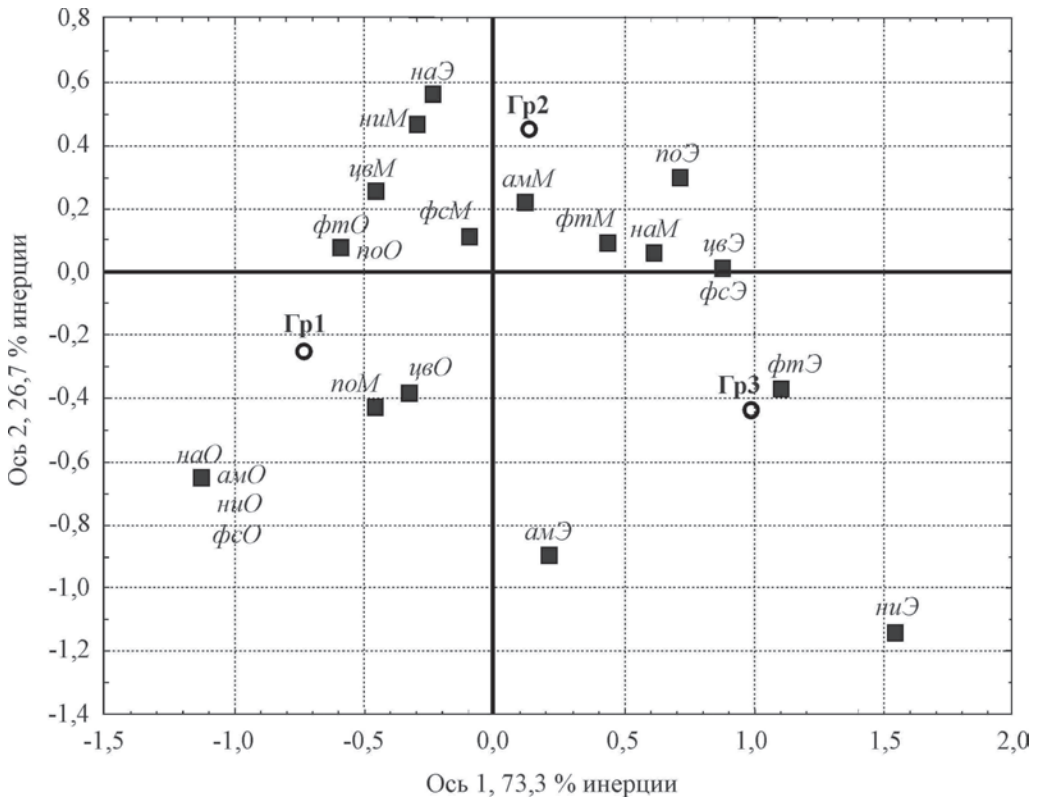


Рис. 3. Графическое решение таблицы 3 в пространстве двух главных осей, асимметричная карта (анализ соответствий).

Условные обозначения: *ам* — аммоний, *ни* — нитриты, *на* — нитраты, *фт* — ортофосфаты, *фс* — общий фосфор, *цв* — цветность, *по* — перманганатная окисляемость, *О* — олиготрофное, *М* — мезотрофное, *Э* — эвтрофное содержание (по шкале [15]).

Fig. 3. Graphical solution of Table 3 in the space of two main axes, asymmetric map (correspondence analysis).

Symbols: *ам* — ammonium, *ни* — nitrites, *на* — nitrates, *фт* — orthophosphates, *фс* — total phosphorus, *цв* — color, *по* — permanganate oxidizability, *О* — oligotrophic, *М* — mesotrophic, *Э* — eutrophic concentration (according to the scale [15]).

Горизонтальную ось 1 можно обозначить, исходя из значения главных точек, как «олиготрофное содержание нитратов» — «эвтрофное содержание нитритов». Аналогично на «олиготрофные» и «эвтрофные» разделяются на оси и точки остальных ГП. Данная ось разделяет водоемы по группам «олиготрофные» и «эвтрофные»: точка группы 1 находится в отрицательной стороне пространства характеристик с признаками олиготрофии — наиболее низким содержанием всех ГП, точка группы 3 — в положительной стороне с противоположными по значению признаками. Точка группы 2 лежит вблизи центра оси 1, следовательно, для

нее не характерны атрибуты ни положительного, ни отрицательного ее полюсов. Она расположена рядом с точками ГП, имеющими преимущественно «мезотрофные» значения. Итак, ось 1 в двухмерной системе координат АС по существу представляет собой аналог шкалы олиготрофно-эвтрофной сукцессии, где группы 1, 2 и 3 представляют олиготрофные, мезотрофные и эвтрофные водоемы. Наибольшее значение для распределения групп в пространстве АС имеют биогенные вещества азотной группы, а именно нитриты и нитраты, а вовсе не фосфор и фосфаты, как можно было ожидать, исходя из традиционных представлений. Немаловажное значение для эвтрофной части шкалы имеют также показатели концентрации органического вещества: цветность и перманганатная окисляемость. Высокое содержание растворенной органики оказывается существенным фактором для отнесения водоемов к эвтрофному типу.

Для второстепенной оси 2 (26,7 %) основной вклад в инерцию вносят точки:

— отрицательное направление

нитриты Э (0,265), нитраты О (0,107), аммоний Э (0,081);

— положительное направление

нитриты М (0,142).

Если измерение 1 разводит группы 1 и 3 олиготрофных и эвтрофных водоемов, то измерение 2 дополнительно отделяет от них группу 2, для которой наиболее существенной характеристикой становится мезотрофная концентрация нитритов и максимальное удаление в пространстве АС от олиготрофных и эвтрофных концентраций веществ азотной группы. Вполне естественно охарактеризовать группу 2 как кластер мезотрофных водоемов. Следует подчеркнуть, что для обоих измерений АС из всех ГП содержание нитритов является основным определяющим признаком, «разделяющим» анализируемые группы водоемов. Однако концентрация в воде фосфатов и общего фосфора не вносит никакого заметного вклада в формирование анализируемой классификационной структуры.

Перейдем к анализу результатов многомерного шкалирования (рис. 4). Распределение водоемов в пространстве МШ вдоль шкалы 1, согласно итогам АС, хорошо согласуется с их трофическим статусом — в левой части оси находятся озера из 3 группы, которую мы определили как эвтрофную, а в правой — из 1 группы олиготрофных водоемов, т.е. отрицательные значения соответствуют высокой степени эвтрофии, положительные — олиготрофии.

Водоемы, сконцентрированные возле нулевой отметки, принадлежат к группе мезотрофных. Сложнее интерпретировать шкалу 2. По градиенту шкалы 2 рядом расположены совершенно разнородные озера — по географическому положению, морфометрии, минерализации вод и т.д. Тем не менее, определенную закономерность все же можно обнаружить: в положительной части шкалы 2 расположены озера с ярко выраженным трофическим статусом — характерно олиготрофные и эвтрофные, тогда как ниже 0 — водоемы, менее определенно принадлежащие к своей категории. Чем более четко выражен трофический тип, тем выше по шкале 2 расположен водоем. Так, наиболее характерные представители — Табанкуль (политрофный), Тургояк, Еловое, Аракуль (типично олиготрофные и ультраолиготрофные), тогда как, например, Б. Миассово и Б. Кисегач имеют неустойчивый

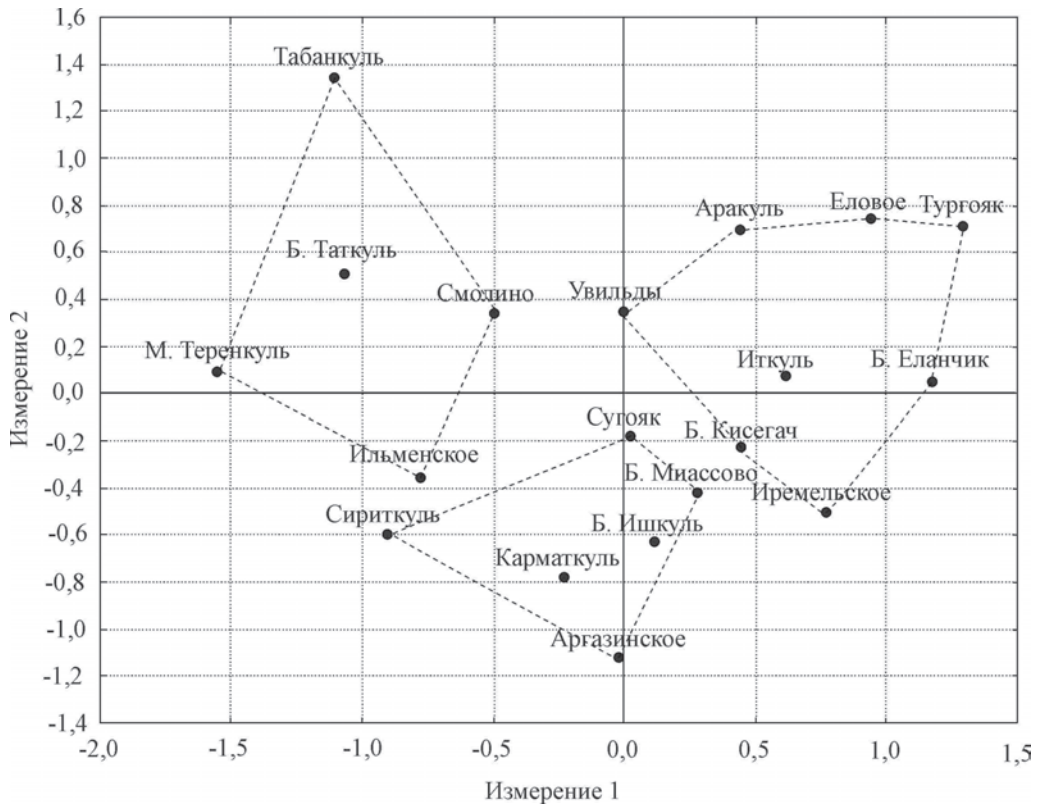


Рис. 4. Диаграмма результатов многомерного шкалирования данных табл. 2.

Fig. 4. Chart of results of multivariate scaling of table 2.

трофический тип, колеблющийся от олиго- до мезотрофии. Такой водоем как Аргазинское водохранилище обладает наиболее неопределенным статусом [23]. Таким образом, шкалу 1 мы интерпретируем как положение водоема на шкале олиготрофно-эвтрофной сукцессии, а шкалу 2 — как «определенность» этого положения.

Заклучение

В работе выполнена классификация 19 важнейших водоемов Южного Урала по трофическому типу по комплексу из 7 гидрохимических показателей. Во всех изученных водоемах наблюдались значительные сезонные, пространственные и многолетние колебания содержания основных ГП. Для корректного анализа большого массива данных и исключения субъективного фактора в выявлении трофического статуса была выполнена его обработка методами многомерного статистического анализа. С помощью кластерного анализа и многомерного шкалирования были выделены устойчивые сочетания гидрохимических показателей,

объединяющих классифицируемые объекты (водоемы) в группы, а метод анализа соответствий использовался для интерпретации выделенных групп и выявления наиболее существенных факторов, определяющих результаты кластеризации.

В результате 19 водоемов Южного Урала по комплексу из 7 биопродукционно-гидрохимических показателей были разбиты на 3 квазиоднородных группы (района). С помощью анализа соответствий эти группы интерпретированы как трофические типы водоемов (олиго-, мезо- и эвтрофный). К олиготрофным относятся озера Аракуль, Большой Еланчик, Еловое, Иткуль, Тургояк, Увильды и Иремельское водохранилище, мезотрофным — озера Большой Ишкуль, Большой Кисегач, Большое Миассово, Ильменское, Карматкуль, Сириткуль, Сугояк и Аргазинское водохранилище, эвтрофным — Большой Таткуль, Малый Теренкуль, Смолино, Табанкуль. Некоторые водоемы из перечисленных имеют переходный трофический статус.

Среди основных гидрохимических показателей наибольшее значение для трофической классификации южноуральских водоемов имеют вещества азотной группы, а среди них — содержание в воде нитритов.

Список литературы

1. Naumann E. The Scope and Chief Problems of Regional Limnology // *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 1929. Vol. 21. 423 p.
2. Naumann E. Limnologische Terminologie // *Abderhalden's Handbuch biol. Arbeitsmeth.* 1931. Bd. 9. № 8. 776 p.
3. Thienemann A. Die Binnengewässer Mitteleuropas: Eine limnologische Einführung. Stuttgart: E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 1926. 255 p.
4. Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ: Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
5. Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 130 с.
6. Åberg B., Rhode W. Über die milieufaktoren in einigen südschwedischen seen // *Symb. Bot. Ups.* 1942. Bd. 5. № 3. 256 p.
7. Beeton A. M., Edmonson W. T. The Eutrophication Problem // *J. Fish. Res.* 1972. Vol. 29. P. 673—682. doi: 10.1139/f72-113.
8. Berg K. A. J., Petersen I. B. C. Studies on the Humic Acid Lake Gribso. Witham: Fossil Books, 1956. 273 p.
9. Canfield D. E. Jr., Langeland K. A., Maceina M. J. et al. Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 1713—1718.
10. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography.* 1977. Vol. 22. P. 361—369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
11. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, physics and chemistry. New York: Wiley, 1957. 1015 p.
12. Ruttner F. Grundriss der Limnologie (Hydrobiologie des Süßwassers). Kerkwerke: Backhuys Biological Books, 1952. 232 p.
13. Vollenweider R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication // *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 1976. Vol. 33. P. 53—83.
14. Бульон В. В. Взаимосвязь между содержанием хлорофилла «а» в планктоне и прозрачностью воды по диску Секки // *Доклады АН СССР.* 1977. Т. 236. № 2. С. 505—508.
15. Оксийук О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // *Гидробиологический журнал.* 1993. Т. 29. № 4. С. 62—77.

16. Йоргенсен С. Э. Управление озерными системами. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.
17. Андреева М. А. Озера Среднего и Южного Урала: Гидрологический режим и влияние на него атмосферной циркуляции. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1973. 272 с.
18. Баранов И. В. Основы биопродукционной гидрохимии. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 112 с.
19. Рогозин А. Г. Зоопланктон гипертрофного водоема на примере озера Табанкуль (Южный Урал): условия существования // Известия Челябинского научного центра РАН. 2006. Вып. 3. С. 73—77.
20. Рогозин А. Г. Зоопланктон озера Малый Теренкуль (Южный Урал) // Известия Челябинского научного центра. 2009. Вып. 3. С. 29—33.
21. Захаров С. Г. Озеро Большое Кисегач. Челябинск: Челябинский дом печати, 2002. 48 с.
22. Захаров С. Г. Озеро Еловое. Челябинск: Челябинский дом печати, 2002. 26 с.
23. Рогозин А. Г. Зоопланктон Аргазинского водохранилища (Южный Урал) и его многолетние изменения // Биология внутренних вод. 2013. № 2. С. 25—33. doi: 10.1134/S1995082913020077.
24. Рогозин А. Г. Экологические проблемы Кисегач-Миассовской озерной системы (Южный Урал) // Проблемы региональной экологии. 2014. № 5. С. 20—24.
25. Ткачев В. А., Рогозин А. Г., Гаврилкина С. В. и др. Экология озера Тургояк / Под ред. В. А. Ткачева, А. Г. Рогозина. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1998. 154 с.
26. Рогозин А. Г., Ткачев В. А., Гаврилкина С. В. и др. Экология озера Большое Миассово / Под ред. А. Г. Рогозина, В. А. Ткачева. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2000. 318 с.
27. Greenacre M. J. Theory and Applications of Correspondence Analysis. London: Academic Press, 1984. 364 p.
28. Everitt B. S., Landau S., Leese M. et al. Cluster Analysis. London: John Wiley and Sons, 2011. 348 p.

References

1. Naumann E. The Scope and chief problems of regional limnology. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 1929; 21: 423 p.
2. Naumann E. Limnologische terminologie. *Abderhalden's Handbuch biol. Arbeitsmeth.* 1931; 9(8): 776 p.
3. Thienemann A. Die Binnengewässer Mitteleuropas: Eine limnologische Einführung. Stuttgart: E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 1926: 255 p.
4. Datsenko Yu.S. *Ehvtrofirovanie vodohranilishch = Eutrophication of reservoirs.* Moscow: GEOS, 2007: 252 p. (In Russ.).
5. Kitaev S. P. *Ehkolozicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznyh prirodnyh zon = Ecological bases of lake bioproductivity of a different natural areas.* Moscow: Nauka, 1984: 130 p. (In Russ.).
6. Åberg B. Über die milieufaktoren in einigen südschwedischen seen. *Symb. Bot. Ups.* 1942; 5(3): 256 p.
7. Beeton A. M., Edmonson W. T. The Eutrophication Problem. *J. Fish. Res.* 1972; (29): 673—682. doi: 10.1139/f72-113.
8. Berg K. A. J., Petersen I. B. C. Studies on the Humic Acid Lake Gribso. Witham: Fossil Books, 1956: 273 p.
9. Canfield Jr. D. E., Langeland K. A., Maceina M. J. et al. Trophic State Classification of Lakes with Aquatic Macrophytes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1983; 40: 1713—1718.
10. Carlson R. E. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography.* 1977; 22: 361—369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
11. Hutchinson G. E. A Treatise on Limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. New York: Wiley, 1957: 1015 p.
12. Ruttner F. Grundriss der Limnologie (Hydrobiologie des Süßwassers). Kerkwerve: Backhuys Biological Books, 1952: 232 p.
13. Vollenweider R. A. Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 1976; (33):53—83.
14. Bul'on V.V. Correlation Between Chlorophyll "a" Concentration in Plankton and Water Transparency According to the Secchi Disc. *Doklady Akademii Nauk SSSR = Doklady of the Academy of Sciences of the U.S.S.R.* 1977; 236(2): (505—508). (In Russ.).

15. Oksiyuk O. P., Zhukinskij V. N., Braginskij L. P. et al. Integrated Ecological Classification of Surface Water Quality. *Hydrobiol. J.* 1993; 29(4): (62—77). (In Russ.).
16. Jørgensen S. E. *Lake Management*. Oxford — New York — Toronto — Sydney — Paris — Frankfurt: Pergamon Press, 1980: 160 p.
17. Andreeva M. A. *Ozera Srednego i Yuzhnogo Urala = Lakes of the Middle and Southern Urals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdetel'stvo, 1973: 272 p. (In Russ.).
18. Baranov I. V. *Osnovy bioprodukcionnoj gidrohimii = Bases of bioproductive hydrochemistry*. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1982: 112 p. (In Russ.).
19. Rogozin A. G. Zooplankton in a hypertrophic lake (On an example of Lake Tabankul (Southern Urals): Conditions of existence. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra = Proceedings of the Chelyabinsk scientific center*. 2006; (3): (73—77). (In Russ.).
20. Rogozin A. G. Zooplankton of Lake Malyj Terenkul' (Southern Urals). *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra = Proceedings of the Chelyabinsk scientific center*. 2009; (3): (29—33). (In Russ.).
21. Zakharov S. G. *Ozero Bol'shoj Kisegach = Lake Bol'shoj Kisegach*. Chelyabinsk: Chelyabinskij dom pečati, 2002: 48 p. (In Russ.).
22. Zakharov S. G. *Ozero Elovoe = Lake Elovoe*. Chelyabinsk: Chelyabinskij dom pečati, 2002: 26 p. (In Russ.).
23. Rogozin A. G. Zooplankton of the Agazi Reservoir (Southern Urals, Russia) and its long-term changes. *Inland Water Biology*. 2013;(2): (25—33). doi: 10.1134/S1995082913020077.
24. Rogozin A. G. Ekhologicheskie problemy Kisegach-Miassovskoj ozernoj sistemy (Yuzhnyj Ural) = Ecological problems of Kisegach–Miassovo lake system (Southern Urals). *Problemy regional'noj ehkologii = Problems of regional ecology*. 2014; (5): (20—24). (In Russ.).
25. *Ehkologiya ozera Turgoyak = Ecology of Lake Turgoyak*. Miass: IGZ UrO RAN Publ., 1998: 154 p. (In Russ.).
26. *Ehkologiya ozera Bol'shoe Miassovo = Ecology of Lake Bol'shoe Miassovo*. Miass: IGZ UrO RAN Publ., 2000: 318 p. (In Russ.).
27. Greenacre M. J. *Theory and applications of correspondence analysis*. London: Academic Press, 1984: 364 p.
28. Everitt B. S., Landau S., Leese M. et al. *Cluster Analysis*. London: John Wiley and Sons, 2011: 348 p.

Сведения об авторе

Александр Генрихович Рогозин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии РАН, rogozin57@gmail.com.

Information about author

Alexander Genrikhovich Rogozin, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology of the Russian Academy of Sciences, rogozin57@gmail.com.

Статья поступила 21.06.2023

Принята к печати после доработки 19.10.2023

The article was received on 21.06.2023

The article was accepted after revision on 19.10.2023

УДК 001(092)

К 80-летию Михая Гавриловича Лазара

***Игорь Анатольевич Кольцов, Маргарита Андреевна Дмитриева,
Яна Владимировна Бубнова***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург



Михай Гаврилович Лазар родился 9 декабря 1943 г. в Румынии, в небольшом горном поселении. Он был младшим ребенком в рабочей семье. Жизнь в Румынии в военные и первые послевоенные годы была трудна и полна лишений. Потом Михай Гаврилович часто делился с коллегами воспоминаниями о своем детстве, «когда семье едва хватало средств на еду, а сладости дети могли поесть только раз или два в год по особым случаям».

В 1962 г., будучи студентом Ясского университета (Румыния), Михай Лазар был направлен на учебу в СССР. В 1967 г. он окончил философский факультет Ленинградского университета (ныне СПбГУ), а затем в течение года работал в Румынии учителем истории в школе. В 1969 г. в связи с заключением брака с советской гражданкой вернулся в СССР. С 1969 г. по 1971 г. М. Г. Лазар работал преподавателем в Гродненском педагогическом институте (Белорусская ССР), а в 1971 г., став гражданином СССР, был принят на работу в Ленинградское отделение Института философии Академии наук СССР на должность младшего научного сотрудника. В 1976 г., будучи научным сотрудником Института социально-экономических проблем АН СССР, М. Г. Лазар защитил кандидатскую диссертацию.

Защита докторской диссертации на тему «Философско-социологические аспекты взаимоотношений науки и морали» на философском факультете ЛГУ

стала возможной для М. Г. Лазара только в конце 1988 г., когда социология смогла получить полноценное признание в качестве научной дисциплины.

В РГГМУ М. Г. Лазар работал с 1980 г., сначала в должности доцента кафедры марксизма-ленинизма, а с 1990 г. — на кафедре социально-гуманитарных наук профессором. В 2022 году исполнилось 55 лет его научно-педагогической деятельности и 42 года работы в качестве преподавателя в стенах ЛГМИ-РГГМИ-РГГМУ.

В 1985 г. опубликовал первую в СССР монографию «Этика науки», став одним из основателей нового направления науковедения в стране. В 80-е—90-е гг. XX в. Михай Гаврилович Лазар являлся одним из соавторов первого в стране профессионального кодекса социологов, членом Российского общества социологов, редколлегии журнала «Социология науки и технологий», диссертационного Совета факультета философии человека РГПУ им. А. И. Герцена. Профессор М. Г. Лазар до августа 2013 г. являлся экспертом российских научных фондов РФФИ, РГНФ, Комитета по науке и образованию Правительства Санкт-Петербурга.

На протяжении многолетней научной деятельности М.Г. Лазара не покидала мысль об упущенных по идеологическим причинам возможностях развития российской социологии в XX столетии. Михай Гаврилович сожалел, что социология как наука в СССР была подменена марксистско-ленинской философией, что не давало возможности для полноценного развития этой отрасли гуманитарного знания.

Особо важную роль в сохранении и развитии социологии науки в России и мире М. Г. Лазар отводил деятельности Санкт-Петербургского филиала Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова Российской Академии наук, в котором проводились исследования различных аспектов истории науки, в том числе двусторонней связи науки и социума.

Профессор М. Г. Лазар рассматривал вопросы современного развития России комплексно, в контексте основных социально-гуманитарных наук, учитывая этапы и особенности исторического развития России, особенности культуры и менталитета, характерные для различных регионов. В работах М. Г. Лазара ставились вопросы развития науки, важности научного подхода в образовании, решения проблем экологии в России, понимания экологической парадигмы, указывалась значимость этики и сетевого этикета в вопросах набирающей обороты системы виртуальной коммуникации.

На протяжении почти двадцати лет профессора Лазара как преподавателя и как ученого интересовал вопрос вхождения России в Болонскую систему образования и его долгосрочные последствия, поэтому, проводя оценку нововведений и их ближайших результатов, приходил к следующим выводам: *«в результате перехода в вузах России от нормального образования к «оказыванию образовательных услуг клиентам – студентам», продуктом высшего образования в России выступает уже не творческая личность специалиста, не генератор идей, способный рассуждать, думать, принимать самостоятельные решения, а некий робот, идеальный исполнитель, хотя создатели компетенций каждый раз при их многократном изменении, при их «усовершенствовании» стараются подчеркнуть именно эту мысль – рост творческих способностей выпускника».*

По мнению профессора М. Г. Лазара, подобная система обучения также связана со стремлением российских вузов к улучшению рейтингов и количественных показателей, и позволяет готовить большое количество специалистов в узких областях, обладающих компетенциями, актуальными лишь для узкого круга работодателей, что создает проблему трудоустройства внутри Российской Федерации и провоцирует отток специалистов за рубеж. Понимая многочисленные аспекты этой важной проблемы, профессор Лазар делал на них акцент на занятиях со студентами, магистрантами и аспирантами, на заседаниях Ученого совета факультета, указывал их в своих работах.

В научных трудах М.Г. Лазара неоднократно освещалась проблема плагиата в его различных формах. Он неоднократно указывал, что подобная стратегия улучшения показателей российских научных университетов в мировых рейтингах за счет увеличения количества статей, создает также проблему коммерциализации процесса публикации без должной научной экспертизы, что негативно сказывается на качестве публикаций и самой научной работы в целом.

В трудах профессора М. Г. Лазара содержится подробный анализ определений и форм плагиата, а также истории его развития от древности до наших дней, на основе которого им было сформулировано новое определение: *«Плагиат – это использование фрагмента (фрагментов) текста другого автора без ссылки на его работу, это использование любых других форм информации из чужой работы, нового названия явления или закономерности»*. Также им был предложен ряд методов борьбы с плагиатом в научной среде, воплощение которых в жизнь он надеялся заставить:

— на уровне научной дисциплины (установление контроля качества публикаций и количественного соотношения цитирований и ссылок на 1 печатный лист статьи);

— на уровне социальной матрицы (уровень культуры общества – подготовка молодых ученых в вопросах научной этики, воспитание чувства чести и порядочности ученых через личные примеры и дисциплины по научной этике);

— на административном уровне (применение административных взысканий в научной среде, вплоть до увольнения ученых из научных учреждений и лишения их научных степеней и званий).

М. Г. Лазар уделял большое внимание изучению и обоснованию понятия призвания ученого, придавал большое значение этосу науки, указывал на необходимость изучения истории его развития и основных положений в средних и высших учебных заведениях России. Этос науки понимался им как комплекс норм и идеалов морали, принятых в науке, которого обязаны придерживаться ученые всех областей научного знания. Проблему этоса науки он видел в том, что в современной постакадемической науке это понятие приобрело, скорее, прагматический, нежели нравственный характер. Подобное направление развития научного сообщества в России для интеллигентного человека, настоящего ученого и науковеда профессора Лазара было недопустимым, в связи с чем, по его мнению, система научных ценностей требовала срочной и грамотной корректировки. Основываясь на данных социологических исследований. Михай Гаврилович Лазар считал, что

«публичное обсуждение этических проблем науки способствует формированию положительного имиджа науки в общественном мнении», предлагал уделять большее внимание «возрастанию роли морального фактора в функционировании социального института», в первую очередь, путем передачи этических знаний через предмет.

Профессор М. Г. Лазар являлся автором более 220 учебно-методических и научных работ в области истории румынской эстетики и социологии, этики и социологии науки, социологии образования, науковедения, политологии, в том числе одного учебника, трех монографий, многочисленных коллективных монографий, статей в российских и зарубежных журналах и сборниках.

На кафедре социально-гуманитарных наук РГГМУ профессор Михай Гаврилович Лазар преподавал на протяжении почти 42 лет. Он являлся постоянным автором журнала «Ученые записки РГГМУ», являлся соавтором создания нового в России направления подготовки бакалавров, магистров «Социальная экология».

Михай Гаврилович был глубоко интеллигентным и благородным человеком, прекрасным педагогом, настоящим ученым, просветителем, добрым и надежным коллегой, с которым было приятно и интересно работать. Михай Гаврилович обладал природным остроумием и глубоким чувством юмора, с удовольствием принимал участие в научных и культурно-творческих мероприятиях, был добрым и отзывчивым человеком, радел за сохранение и процветание науки в России.

М. Г. Лазар неоднократно был отмечен благодарностями руководства РГГМУ, награжден знаком «Почетный работник РГГМУ», знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». Похоронен Михай Гаврилович в 2022 г. на родине, в Румынии, в старинном предгорном городке Пятра Нямц.

Информация об авторах

Игорь Анатольевич Кольцов, доктор исторических наук, профессор кафедры социально-гуманитарных наук Российского государственного гидрометеорологического университета, kafedra_sgn@rshu.ru.

Маргарита Андреевна Дмитриева, специалист по учебно-методической работе кафедры социально-гуманитарных наук Российского государственного гидрометеорологического университета, e-mail, kafedra_sgn@rshu.ru.

Яна Владимировна Бубнова, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных наук Российского государственного гидрометеорологического университета, bubayana1979@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 05.06.2023

Принята в печать 11.11.2023

The article was received on 05.06.2023

The article was accepted 11.11.2023

УДК 001(063)

Семинар-совещание с редакторами научных журналов по разработке международного индекса научного цитирования

20 октября 2023 г. в Таврическом дворце состоялся семинар-совещание с редакторами научных журналов, председателями экспертных советов ВАК, представителями библиотек и научно-образовательных организаций, занимающихся вопросами наукометрии. Организаторами выступили Межпарламентская Ассамблея СНГ; Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации; Российский научно-исследовательский институт экономики, политики и права в научно-технической сфере; Международный центр научной информации. Открыл мероприятие заместитель руководителя Секретариата Совета МПА СНГ — директор Международного института мониторинга развития демократии СНГ, доктор юридических наук, профессор *Иван Мушкет*. Он отметил, что в семинаре принимают участие



Директор Международного института мониторинга развития демократии СНГ, член редколлегии журнала «Гидрометеорология и экология», доктор юридических наук, профессор Иван Мушкет.

120 человек в очном формате и 25 человек по видеоконференцсвязи, представляющие Беларусь, Казахстан, Кыргызстан, Россию и Таджикистан.

Приветственное слово участникам семинара направил Генеральный секретарь Совета МПА СНГ *Дмитрий Кобицкий*. Он отметил, что создание международной системы оценки результативности научных исследований и разработок – академического рейтинга научных журналов рассмотрено и поддержано Постоянной комиссией по науке и образованию МПА СНГ и Экспертным советом по науке и образованию при МПА СНГ. Приветствие в адрес участников семинара также направил председатель Комитета Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации по науке и высшему образованию, кандидат юридических наук, заслуженный юрист Российской Федерации *Сергей Кабышев*. Он подчеркнул, что ученые из стран Содружества не имеют свободного доступа к международным научным базам. Представители профильных комитетов по науке из парламентов государств СНГ неоднократно высказывались о необходимости создания независимого и объективного индекса научного цитирования.

В приветственном слове председателя Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, доктора физико-математических наук, профессора, академика Российской академии образования *Владимира Филиппова* обращалось внимание на то, что наукометрия получила развитие на пространстве Содружества в 50-е годы XX века. Руководители и представители Высших аттестационных комиссий из государств СНГ множество раз поднимали вопросы о создании единого объективно индексируемого перечня научных изданий стран Содружества и всех других заинтересованных государств.

Директор Российского научно-исследовательского института экономики, политики и права в научно-технической сфере, главный редактор журнала «*Управление наукой и наукометрия*», доктор экономических наук, доцент *Ирина Ильина* подробно рассказала о создании базы данных «*Российские научные журналы*» и критериях, которые применяются для ранжирования научных журналов, включенных в эту базу данных. По ее мнению, идеи и наработки, сделанные в процессе формирования портала, будут полезными при создании критериев ранжирования МИНЦ. Также докладчик выразила надежду на плодотворное сотрудничество с создателями МИНЦ.

В своем выступлении главный ученый секретарь Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, ректор Университета прокуратуры Российской Федерации, доктор юридических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации *Игорь Мацкевич* отметил, что ВАК при Минобрнауки РФ активно участвует в создании МИНЦ и постоянно взаимодействует по данному вопросу с Высшими аттестационными комиссиями государств СНГ. По его мнению, МИНЦ позволит ученым из стран Содружества осуществлять максимально тесное взаимодействие в своих исследованиях. Кроме того, МИНЦ будет состоять из нескольких рейтингов, будут созданы все возможности для размещения работ на национальных языках государств Содружества.



Выступает главный ученый секретарь ВАКа, доктор юридических наук, профессор Игорь Мацкевич

Директор Международного центра научной информации, доктор экономических наук, профессор *Сергей Курдюков* выступил с докладом «*Международный индекс научного цитирования как инструмент развития научных коммуникаций и координации научных исследований в государствах — участниках СНГ*». Он рассказал, что в процессе создания МИНЦ использовались передовые разработки в области наукометрии, а также новейшие технологии для анализа и ранжирования текстов исследований. Профессор сообщил участникам семинара, что более двух тысяч научных журналов выразили заинтересованность во вхождении в МИНЦ.

В ходе дискуссии член Комитета Маджлиси намояндагон Маджлиси Оли Республики Таджикистан по аграрным вопросам, водным и земельным ресурсам, кандидат экономических наук, доцент *Зоир Рахмонзода* высказал мнение, что продвижение МИНЦ будет содействовать росту количества и качества научных исследований, повышению уровня мотивации и публикационной активности молодых ученых, развитию международного сотрудничества, а также обеспечению научного суверенитета государств СНГ.

Руководитель Общественного объединения «*Центр устойчивого развития Ошаг*» (Республика Казахстан) доктор юридических наук, профессор *Саркытбек Молдабаев* выразил надежду, что в работе МИНЦ будут участвовать

как представители стран СНГ, так и других государств. Заведующий кафедрой экономической политики и государственного управления Академии управления при Президенте Республики Беларусь, заместитель главного редактора журнала «Проблемы управления», доктор исторических наук *Валерий Мацель* заявил о готовности вуза принять деятельное участие в запуске МИНЦ.

В ходе дискуссии заместитель главного редактора журнала «Проблемы прогнозирования», заместитель директора и заведующий лабораторией анализа и прогнозирования микроэкономических процессов Института народнохозяйственного прогнозирования РАН, доктор экономических наук *Дмитрий Кувалин* предложил регулярно проводить рабочие экспертные совещания, в ходе которых будут обсуждаться актуальные вопросы наукометрии, такие как изменения подсчета рейтингов научных журналов. Профессор кафедры общей экономической теории и истории экономической мысли Санкт-Петербургского государственного экономического университета, доктор экономических наук, профессор *Андрей Харламов* выразил надежду на успешную работу механизма по поиску оппонентов и ведущую организацию по диссертации. Заведующий инновационно-аналитическим отделом научно-исследовательского центра Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета *Алексей Меклер* высказал предложение об использовании передовых средств машинной обработки в МИНЦ для исключения случаев самоцитирования и договорного цитирования.

Заместитель директора Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук по научной работе, ученый секретарь института, заместитель руководителя Базовой организации государств-участников СНГ в области подготовки научных кадров по физическим наукам, кандидат физико-математических наук *Андрей Колобов* отметил важность присоединения к МИНЦ ведущих мировых журналов в сфере естественных наук.

Отвечая на вопросы участников, Игорь Мацкевич подчеркнул, что МИНЦ будет включать отдельные рейтинги для монографий, научно-популярных и иных работ. Именно это и является отличительной чертой Международного индекса научной цитируемости от индексов научного цитирования стран Европы и США.

Участники предложили обратиться в профильные министерства и ВАК государств СНГ на тему сотрудничества с МИНЦ, а также в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации с просьбой разрешить интегрировать данные Портала «*Российские научные журналы*» в МИНЦ. По итогам мероприятия решено *проводить раз в год совещание органов ВАК по совершенствованию критериев ранжирования журналов в МИНЦ и разработать комплекс мер по охране авторских прав на интеллектуальную собственность для исследователей из СНГ.*

В дискуссии на семинаре приняли участие главный редактор журнала «*Гидрометеорология и экология*», профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и комплексного управления прибрежными зонами Российского государственного гидрометеорологического университета, доктор географических наук, профессор *Валерий Малинин*, директор высшей школы юриспруденции и судебно-технической экспертизы, главный редактор журнала «*Актуальные*



Участники семинара 20.10.2023.

проблемы науки и практики», кандидат юридических наук, доцент Дмитрий Морхоров, главный редактор федеральных научно-практических журналов «Юридическая наука: история и современность», «Мир политики и социологии», и «Правовое поле современной экономики», доктор юридических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации Виктор Сальников, проректор по научной работе, заведующая кафедрой проектного менеджмента и управления качеством Санкт-Петербургского государственного экономического университета, доктор экономических наук, профессор Елена Горбашко.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 73

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Технический редактор М.В. Иванова

Подписано в печать 28.12.2023. Выход в свет 12.01.2024. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,8875. Тираж 50 экз. Заказ № 1457. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
