

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 76

Научно-теоретический журнал

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

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2024

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 76. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2024. 176 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:

Михеев В. Л., канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ — *председатель совета*
Леонтьев Д. В., канд. юрид. наук, проректор по развитию и научной работе РГГМУ — *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); **Камолов 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; **Федоров М. П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Холматжанов Б. М.**, д-р геогр. наук, доцент (Узбекистан).

Редакционная коллегия:

Малинин В. Н., д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*
Кондратьев С. А., канд. 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.; **Гриченко 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 биолог. 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-р 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 К2, 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), 2024

© Авторы публикаций, 2024

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

№ 76

A theoretical research journal

Published since October, 2005

4 issues a year

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2024

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 76. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2024. 176 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 speciality. 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 specialities.

The Editorial Board:

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

Leont'ev D. V., PhD in Juridical Sciences, Vice-Rector for Development and 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; **Kholmatzhanov B. M.**, Grand PhD in Geography, Executive editor, Uzbekistan; **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.

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; **Proshutinskiĭ 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 ПИ № 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), 2024
© Authors of publications, 2024

Содержание

Геофизика

- Е. А. Малиновская, С. Д. Калинин, И. В. Зайцева.* Поиск термоконвективных структур в потоке данных 407

Метеорология

- В. С. Коляда, П. А. Голубкин, Ю. Е. Смирнова.* Влияние релаксационных методов ассимиляции на воспроизведение поля скорости ветра в полярном циклоне 422
- В. Ю. Цепелев.* О возможности вертикального зондирования атмосферы при помощи мобильного аэрологического комплекса, размещенного на беспилотном летательном аппарате 437

Климатология

- Л. А. Тимохов, В. Н. Малинин, В. В. Иванов.* Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов 451

Океанология

- И. В. Серых.* Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо — Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе Глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей CMIP6 474

Гидрология

- Т. М. Аксянов, Т. И. Яковлева.* Оценка неопределенности гидрометрического учета стока при использовании однозначной кривой расходов воды 507

Экология

- А. А. Ершова, Е. В. Иванова, Д. А. Тихонова, И. Н. Макеева.* Методические особенности выделения частиц микропластика из проб грунта водных объектов 524
- Н. Н. Камардин, Т. В. Кузнецова, А. Б. Манвелова.* О возможности мониторинга загрязнения пресноводных водоёмов Северо-Запада России с использованием нового биоиндикатора — переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* 542

Хроника

- В. Г. Бурлов.* Конгресс IEEE «Пояс и путь» 2024 года по искусственному интеллекту для устойчивого развития (IEEE AICON2024) 560
- А. О. Волгушева.* Памяти известного ученого, ректора ЛГМИ (1963—1972 гг.) — Олега Александровича Алекина 566
- П. И. Бухарицин, В. Н. Малинин.* Мероприятие-спутник конгресса молодых ученых по смягчению последствий изменения уровня режима Каспийского моря для экономики Республики Дагестан 571

Contents

Geophysics

- E. A. Malinovskaya, S. D. Kalinin, I. V. Zaitseva.* Search for thermoconvective structures in the data stream 407

Meteorology

- V. S. Kolyada, P. A. Golubkin, J. E. Smirnova.* Influence of the four-dimensional data assimilation on the reproduction of polar low wind speed field 422
- V. Y. Tsepelev.* On the possibility of vertical atmospheric sounding with use of mobile aerological complex placed on an unmanned aerial vehicle 437

Climatology

- L. A. Timokhov, V. N. Malinin, V. V. Ivanov.* The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrogeophysical factors 451

Oceanology

- I. V. Serykh.* Assessing the forecast capability of the El Niño–Southern Oscillation with a one-year lead-time using the Global Atmospheric Oscillation based on the results of CMIP6 models. 474

Hydrology

- T. M. Aksyanov, T. I. Yakovleva.* Estimation of uncertainty of hydrometric water discharge computation when using a single-valued discharge curve 507

Ecology

- A. A. Ershova, E. V. Ivanova, D. A. Tikhonova, I. N. Makeeva.* Methodological features of microplastics extraction from samples of bottom sediments of water bodies 524
- N. N. Kamardin, T. V. Kuznetsova, A. B. Manvelova.* On the possibility of monitoring pollution of freshwater bodies of North-West Russia using a new bioindicator — the prosobranch mollusk *Viviparus viviparus*. 542

- Chronicle** 560

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 407—421.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):407—421.

ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК [551.524+551.558.1]:004.032.26
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-407-421

Поиск термоконвективных структур в потоке данных

***Елена Александровна Малиновская¹, Савелий Дмитриевич Калинин^{2,1},
Ирина Владимировна Зайцева^{2,1}***

¹ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия, elen_am@inbox.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет

Аннотация. Идентификация термоконвективных структур в данных высокочастотных пульсационных измерений температуры воздуха в приповерхностном слое на опустыненной территории проведена с использованием алгоритмического и нейросетевого методов. На основе результатов визуального анализа данных создана обучающая выборка образов термоконвективных структур (так называемых «рэмпов»), используемая далее в нейронной сети, анализирующей измерения. Данные о распределении подобных структур по размерам и интенсивности позволяют связать термоконвективные характеристики со скоростью и интенсивностью выноса пылевого аэрозоля с аридных и субаридных территорий.

Ключевые слова: конвекция, база образов, рэмп-структуры, нейронная сеть.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект №23–27–00480.

Для цитирования: Малиновская Е. А., Калинин С. Д., Зайцева И. В. Поиск термоконвективных структур в потоке данных // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 407—421. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-407-421.

GEOPHYSICS

Original article

Search for thermoconvective structures in the data stream

Elena A. Malinovskaya¹, Saveliy D. Kalinin^{2,1}, Irina V. Zaitseva^{2,1}

¹ Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, elen_am@inbox.ru

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

Summary. The problem of automating the search for coherent structures that appear as sawtooth bursts in the measurement data series is considered. As a source of data, we take data from high-frequency measurements of air temperature conducted at heights of less than a meter in conditions of developed convection

(Kalmykia, 2022). Due to the movement of thermal structures under the influence of wind, the sensor detects asymmetric bursts. Therefore, two methods are used to find such a waveform: a filtering algorithm for maxima with a fixed deviation from the mean value and visual pattern recognition using a neural network. The algorithm for searching for “ramp” structures based on statistical data includes three steps: filtering for the value of the standard deviation, determination of local maxima, and the condition of exceeding the mean value for neighboring values. The algorithm allows determining “ramp” structures of a certain size for selected parameters. The distribution of the number of “ramp” structures by size is close to normal. To apply the neural network to search for “ramp” structures within the framework of the problem of pattern recognition, a database of images (about 1000) prepared by an expert was formed. The trained neural network detects “ramps” of the structure from the base from the data stream with an error of 12%. In addition to them, “ramps” with a duration of 0.1–0.2 s are also detected. The distribution of the number of particles by size is determined by a logarithmic function with a preponderance in the number of instances in the direction of short bursts, which is associated with the self-similarity property of thermal structures.

Keywords: convection, image database, “ramp” structures, neural network.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation – project No. 23–27–00480.

For citation: Malinovskaya E. A., Kalinin S. D., Zaitseva I. V. Search for thermoconvective structures in the data stream. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):407–421. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-407-421.

Введение

При конвекции на опустыненных территориях возникают восходящие движения с выносом пылевого субмикронного аэрозоля [1, 2]. Здесь последовательно чередуются прогретые объемы воздуха, переносящие 60–70 % от общего потока ощутимого тепла, составляющие $\frac{1}{4}$ всех фиксируемых событий, за счет чего они обуславливают колебания теплового потока до 30 % [3]. В флуктуациях скорости и температуры, демонстрирующих в целом сложное поведение, наблюдаются типовые частично организованные (когерентные) структуры. При этом для пульсационных составляющих часто выявляются в различных природных и лабораторных наблюдениях пилообразные всплески — рэмпы [4], имеющие несимметричную треугольную форму [5]. С высотой размеры наблюдаемых структур, пульсации температуры и вертикальной компоненты скорости увеличиваются [4], причем замечается возрастание скоррелированности для пульсаций скорости и температуры [6].

Рэмпы выявляются на разной высоте в приповерхностном слое воздуха [5]. Они заметно отделены друг от друга и обладают более четкой структурой на малых, менее 1 метра высотах, и временными масштабами порядка 0,1–0,3 сек [7].

Размеры и амплитуды рэмпов отражают условия возникновения неустойчивых состояний, при которых постепенный рост температуры в результате прогрева поверхности приводит к конвективному вертикальному выбросу теплых масс и возникновению вынужденного перемещения вниз более холодных масс [8].

Рэмп-структуры обнаруживаются при разных временных осреднениях от 1 до 10 мин. данных измерений пульсационных составляющих и демонстрируют определённые свойства самоподобия [7]. Поиск и анализ в больших объемах данных сведений о временных размерах и амплитудах рэмп-структур необходим для получения информации о пространственных характеристиках теплового потока, а также для оценки интенсивности вертикального выноса пылевого аэрозоля с аридных и субаридных территорий.

Схожесть основных параметров рэмп-структур (всплески дисперсии, наличие локальных максимумов и серий и др.) позволяет использовать для их выявления алгоритм трехшаговой фильтрации данных с оценкой статистических характеристик [9].

В современных научных исследованиях все большую популярность приобретает метод поиска объектов с использованием нейронных сетей [10, 11]. Поиск рэмп-структур близок, в частности, к задаче распознавания образов. В работе [12] при исследовании турбулентных структур проводился поиск геометрических всплесков (кластеров) величины напряжения сдвига с помощью многослойных персептронов и рекуррентных нейронных сетей. Сверточные нейронные сети успешно применяются для прогнозирования динамики изменения временных последовательностей реальных данных (причинно-следственные свертки) [13] и прогнозирования временной эволюции когерентных структур в турбулентном потоке в турбине [14] и в канале [15].

В связи с этим целью данного исследования является сравнение применения для поиска рэмп-структур двух способов: алгоритмического и нейросетевого.

В первом разделе приведены сведения об источниках данных. Во втором разделе дается описание объекта исследований — рэмп-структур. В третьем разделе приведено краткое описание алгоритма поиска рэмп-структур на основе статистических данных. В четвертом разделе — результаты применения алгоритмического метода. В пятом разделе — алгоритм подготовки данных, обучение и применение нейронной сети. В шестом разделе представлены результаты применения нейронной сети для поиска рэмп-структур. В седьмом разделе приведено сравнение двух методов.

Источники данных

Для анализа взята выборка одного часа (10:56—11:56) 29.07.2022 на высоте 20 см над поверхностью, полученная при комплексных полевых измерениях Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (ИФА им. А. М. Обухова РАН) на аридных территориях с подвижными песками в Калмыкии. В этот день температура воздуха на высоте 2 м варьировалась в пределах 27—40 °С, температура поверхности — 35—50 °С. Измерения проводились в жаркую солнечную погоду в условиях преобладания слабых ветров. Такие условия хороши для возникновения и развития конвективных структур. Для требуемых здесь высокочастотных измерений температуры и скорости воздуха применялись проволочные температурные датчики и термоанемометры. Толщина используемой здесь платинированной вольфрамовой нити составляла 10 мкм, частота регистрации — 1000 Гц [7]. Указанные параметры дают возможность наблюдать мелкомасштабные конвективные структуры у поверхности.

О форме наблюдаемого сигнала

Используем модель-аналог — пламя свечи на ветру. Со стороны ветра имеется четкая граница между пламенем и воздухом, а противоположная сторона

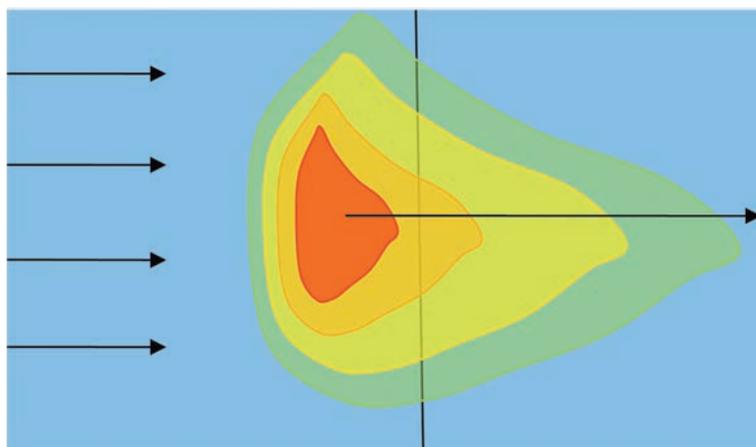


Рис. 1. Визуальное представление переноса термоконвективной структуры ветром относительно вертикальной нити.

Fig. 1. Visual representation of thermoconvective structure transport by wind relative to a vertical filament.

представляет собой более размытую форму и границы. При отсутствии ветра поднимающийся от ровной нагретой поверхности объем воздуха имеет почти симметричную форму. При воздействии ветра тепловая структура уже теряет симметрию, как и пламя свечи (рис. 1). Структура, переносимая ветром и пересекающая нить датчика, отразится в регистрируемом распределении температуры. В центре тепловой структуры температура немного выше внешнего от центра окружения (более яркая область), а во внешних слоях уменьшается. При перемещении структуры по ветру (слева-направо на рис. 2) регистрируется сначала постепенный рост температуры. На правой границе тепловой структуры, где большее воздействие ветра, рост прекращается, и температура резко падает.

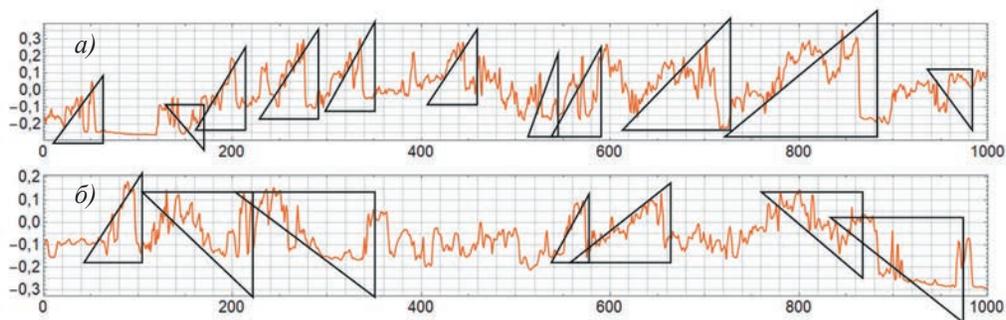


Рис. 2. Два типа рэмп-структур во временном ряду: вершинами вверх и вершинами вниз.

Fig. 2. Two types of ramp-structures in the time series: vertices up and vertices down.

В результате рэмп-структуры могут быть выявлены визуально в силу особенностей роста и падения температуры. При конвективном подъеме теплых масс возникает вынужденная конвекция, когда менее нагретый воздух вытесняется в нижние слои более нагретым, поэтому в условиях прогрева поверхности и восходящих тепловых движений помимо треугольных структур с вершинами вверх отмечаются также аналогичные структуры с вершинами вниз (рис. 2 а, б).

Алгоритмический способ поиска рэмп-структур

Далее используем алгоритм поиска рэмп-структур, направленных вершинами вверх, предложенный при обработке данных лабораторного эксперимента в [9]. Предполагается одновременное выполнение трех условий:

1. Отклонение от среднего больше доли от среднеквадратического отклонения: $\delta T > \alpha T_r$, где $\delta T = T(t + \tau) - T(t)$ — вариации величины T , T_r — стандартное отклонение.

2. В выбранном для анализа интервале имеется максимум значений: $T(t) = \max [T(t_1), T(t_2)]$.

3. Среднее двух близких по времени значений $T(t_1)$ и $T(t_2)$ больше среднего для некоторого интервала: $\frac{T(t_1) + T(t_2)}{2} > \langle T \rangle$.

Для настройки работы алгоритма используются 5 параметров (табл. 1).

Таблица 1

Параметры, используемые в алгоритме поиска рэмп-структур
Parameters used in the algorithm for searching ramp structures

Обозначение	Расшифровка
α	параметр из условия 1
τ	разность времени из условия 1
n	интервал времени, для которого определяется стандартное отклонение
n_{\max}	интервал времени, для которого определяется максимальное значение
$t_2 - t_1$	расстояние между точками на третьем шаге
$n_{(T)}$	интервал времени, для которого среднее арифметическое для третьего шага

Для рэмп-структур вершинами вниз алгоритм будет аналогичным за исключением знаков неравенств, а максимум заменится минимумом. В следующем разделе описаны некоторые результаты применения алгоритма поиска рэмп-структур вершинами вверх.

Результат применения алгоритмического способа поиска

На рис. 1 приведены примеры рэмп-структур, найденных с использованием алгоритмического метода. Это несколько четких структур близкого временного размера двух масштабов: около 0,2—0,4 с (рис. 3 а) и около 1—4 с (рис. 3 б).

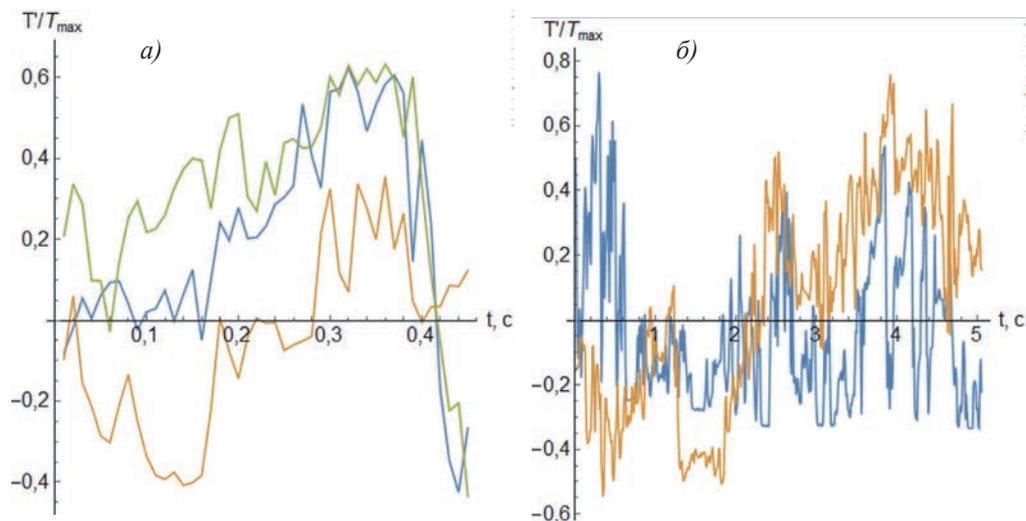


Рис. 3. Обнаруженные алгоритмически рэмпы
 (а — $\alpha = 0,5$, $\tau = 0,3$ с, $n_{T-(T)} = 2,5$ с, $n_{\max} = 0,7$ с, $t_2 - t_1 = 0,04$ с, $n_{(T)} = 0,5$ с;
 б — $\alpha = 0,5$, $\tau = 4,5$ с, $n_{T-(T)} = 30$ с, $t_2 - t_1 = 0,04$ с, $n_{(T)} = 5$ с).

Fig. 3. Algorithmically detected ramps
 (a — $\alpha = 0,5$, $\tau = 0,3$ s, $n_{T-(T)} = 2,5$ s, $n_{\max} = 0,7$ s, $t_2 - t_1 = 0,04$ s, $n_{(T)} = 0,5$ s;
 б — $\alpha = 0,5$, $\tau = 4,5$ s, $n_{T-(T)} = 30$ s, $t_2 - t_1 = 0,04$ s, $n_{(T)} = 5$ s).

Второй тип обладает более сложной формой, содержит более мелкие подструктуры. Для поиска более крупных структур необходимо провести осреднение и повторить процедуру для более крупного масштаба на других временных масштабах. Параметры, используемые в алгоритме (табл. 1), подбираются вручную.

Для выбранного интервала 600 с алгоритм может определить до 30 рэмп-структур длительностью от 0,1 до 0,4 с и относительной амплитудой от 0,2 до 1 с (табл. 2).

Таблица 2

Примеры временных размеров и относительных амплитуд рэмп-структур
 Examples of temporal dimensions and relative amplitudes of ramp-structures

$t, 10^{-2}, \text{с}$	$t_R, \text{с}$	$(T' / T_{\max})_A$
3201	0,30	0,8
3294	0,35	0,6
3370	0,35	0,8
3504	0,15	0,6
3598	0,15	0,6
3624	0,25	0,3
3702	0,30	1,0

Окончание табл. 2

$t, 10^{-2}, \text{с}$	$t_R, \text{с}$	$(T' / T_{\max})_A$
3769	0,25	1,0
3882	0,20	0,5
3901	0,20	0,8
3924	0,30	0,6
4181	0,25	0,8
4301	0,30	0,7
4389	0,35	0,7
4554	0,35	0,6

Из распределений числа рэмп-структур по длительности и по амплитуде определяем, что наиболее часто встречаются временные размеры 0,3 с и амплитуды 0,6 (60 % от максимальной) (рис. 4).

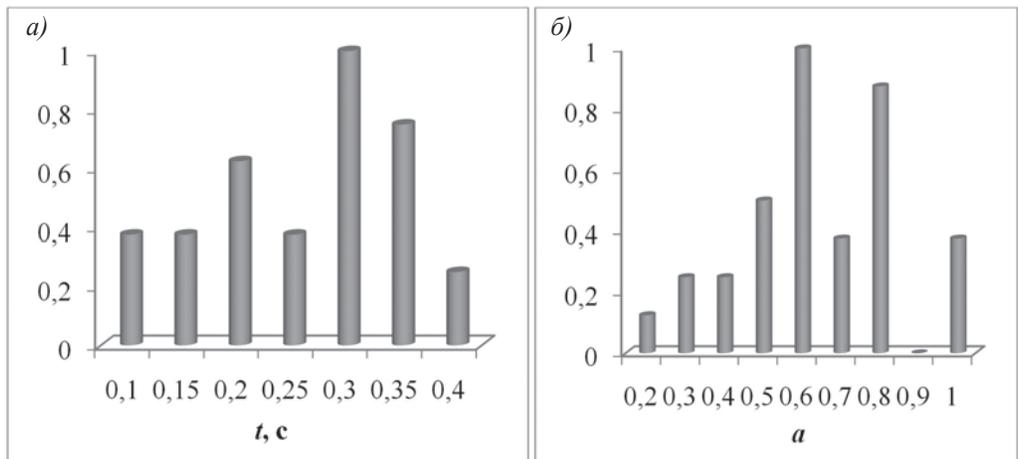


Рис. 4. Распределение числа рэмп-структур:
 а — по длительности (t); б — по относительной амплитуде (a).

Fig. 4. Distribution of the number of ramp-structures:
 а — by duration (t); б — by relative amplitude (a).

Алгоритмический метод для значений ряда позволяет определить по статистическим данным наличие рэмп-структуры определенного масштаба. Параметры при этом подбираются вручную. Далее рассматривается альтернативная методика применения нейронных сетей для поиска рэмп-структур.

Нейронная сеть для поиска рэмп-структур

Использование нейронной сети для поиска рэмп-структур реализовано на той же выборке данных измерений, как и в алгоритмическом методе. Для процедуры идентификации отдельных рэмпов, которую можно отнести к известной задаче

распознавания образов [16], применена тестовая вариация трехслойной сверточной нейронной сети [10].

Для реализации этого метода выполняются следующие подготовительные работы:

1. Определяется X координата начала рэмп-структуры (*not*) и временная длительность (*size*) в результате визуального просмотра разверток по 1000 точек (10 с) (рис. 2). Каждый выбранный двумерный образ сохраняется в цифровом виде как двумерный массив (первый столбец — это исходные данные относительных значений пульсационных составляющих \tilde{T}' , другие — разностные характеристики типа $\tilde{T}'(t) - \tilde{T}'(t + dt)$) (рис. 5). Такая процедура используется в связи с известной теорией структурных функций, по которой, исходя из разностных характеристик, определяются масштабы конвективных процессов [7].

2. Формируются три списка сохраненных файлов: рэмп-вверх (579 файлов), рэмп-вниз (167 файлов) и не-рэмп (14 файлов).

3. Вводятся коэффициенты пропорциональности вследствие того, что временные размеры рэмп-структур отличаются по длительности (варьируются от 200 до 3000 мс). В результате исходные данные в обучающей выборке сведены к одному масштабу.

4. Создается двухслойная нейронная сеть:

— на входной слой (40 нейронов) подаются данные обучающей выборки — параметры из файлов \tilde{T}' и $\tilde{T}'(t) - \tilde{T}'(t + dt)$;

— первый слой (40 нейронов) содержит скрытые нейроны;

— второй слой (3 нейрона) позволяет определить вид рэмп-структур на выходе в конечном слое в соответствии с указанной на шаге 2 классификации образов.

5. Выполняется тестирование нейронной сети первоначально на первых двух столбцах базы образов.

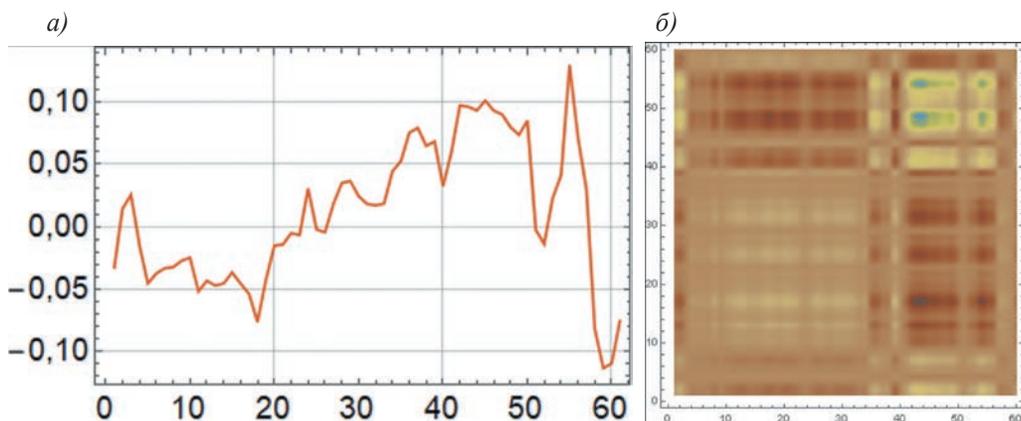


Рис. 5. Участок исходных данных рэмп-структуры (а) и диаграмма рэмп-структуры (б), составленная из столбцов базы образов.

Fig. 5. Plot of the raw data ramp-structure and a diagram of the ramp-structure made from the columns of the image base.

Далее приведен анализ результатов поиска рэмп-структур с использованием нейронной сети.

Результат применения нейронной сети для поиска рэмп-структур

Тестирование обученной нейронной сети для поиска рэмп-структур выполнено на том же наборе данных, что и в алгоритмическом методе. Сопоставление исходных данных с результатами идентификации двумерных образов нейронной сетью дают удовлетворительные результаты (рис. 6). На рис. 6 а показан участок графика исходных данных, которые тестировала нейронная сеть. На рис. 6 б приведены вероятности соответствия анализируемого образа тому или иному виду (рэмп-вниз, рэмп-вверх, не-рэмп) по результатам оценки нейронной сети для этого участка. В результате обучения сети ошибка нейронной сети составляет 12 %. Как видно из рис. 6 в, нейронная сеть при заданном масштабном коэффициенте, равном 5, определяет несколько рэмпов.

Если построить распределение по длительности для найденных моментов времени, то получается, что нейронная сеть определяет более мелкие рэмп-структуры, которые получены первым способом с преобладающей длительностью 0,1 с, что, вероятно, вызвано самоподобием рэмп-структур. Распределение числа частиц по размерам может быть аппроксимировано функцией вида: $N = A \log(-x) + B$.

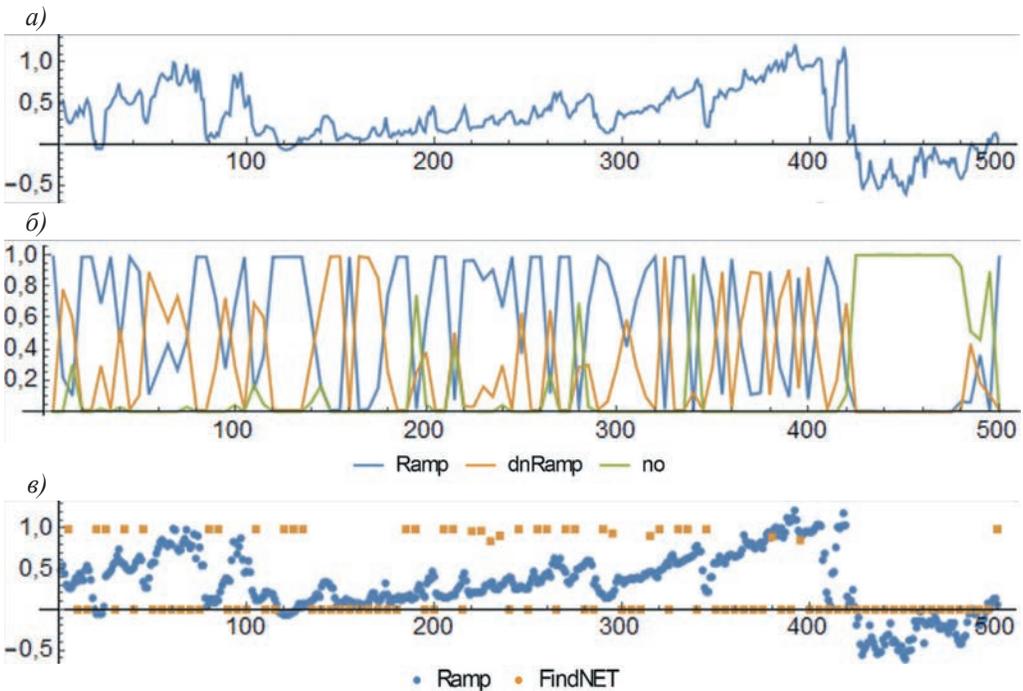


Рис. 6. Отрезок исходных данных в сравнении с результатами анализа нейронной сети.

Fig. 6. Plot of raw data versus neural network analysis results.

Сравнение методов

Применение двух методов для поиска рэмп-структур позволило выявить моменты их возникновения. Алгоритмический метод требует настройки вручную, подбора параметров, которые определяются масштабами обнаруживаемых рэмп-структур. С использованием алгоритма определяется около 50 % рэмпов преимущественно среднего размера из числа выбранных экспертом для базы образов (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение выявленных рэмпов, выбранных экспертом из базы образов, с использованием алгоритма (жирным выделены моменты времени, совпадающие с алгоритмом)

Comparison of detected raps using the algorithm with expert selection for the image base (time points matching the algorithm are in bold)

$t, 10^{-2}, c$								
0	150	225	290	400	500	700	1150	1200
1450	1625	1800	1970	2120	2430	2620	2790	2845
3020	3130	3440	3510	3585	3630	3680	3715	3760
3840	4000	4075	4220	4325	4360	4515	4700	4750
4860	4885	5115	5200	5270	5470	5600	5730	5950
6080	6260	6420	6500	6710	6915	7090	7190	7300
7330	7445	7580	7690	7805	8000	8150	8280	8478
8530	8810	8880						

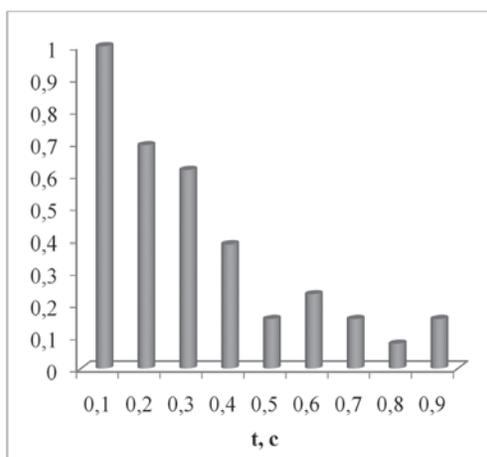


Рис. 7. Распределение рэмп-структур по длительности (t), выделенных с использованием нейронной сети.

Fig. 7. Distribution of ramp-structures by duration (t) extracted using neural network.

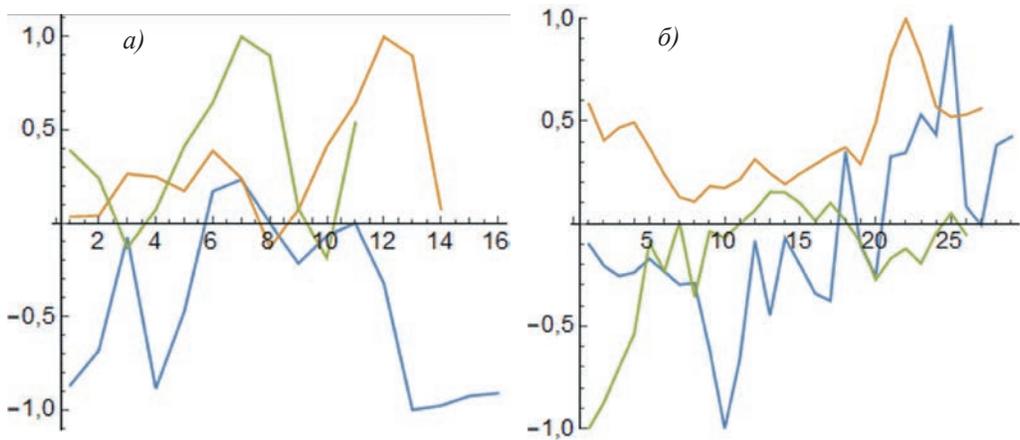


Рис. 8. Примеры отсутствующих в списке эксперта рэмпов, которые определила нейронная сеть (моменты времени *a* — 3,60; 4,50; 4,55; *б* — 8,60; 9,35; 9,55 с).

Fig. 8. Examples of missing ramps in the expert’s list, which were identified by the neural network (time moments *a* — 3,60; 4,50; 4,55; *б* — 8,60; 9,35; 9,55 s).

Тестовое применение нейронной сети позволяет обнаружить большее число мелких рэмп-структур (табл. 4), которые составляют более крупные, найденные первым способом. Определяемые нейронной сетью рэмп-структуры пополняют мелкие образы, которые отсутствуют в базе образов и в алгоритмическом способе определения. Примеры типичных структур, отсутствующих в базе, представлены на рис. 8. Нейронная сеть определила почти все точки с рэмп-структурами, выделенными с использованием алгоритмического метода.

Таблица 4

Сравнение выявленных рэмпов, выбранных экспертом из базы образов, с использованием алгоритма (жирным выделены моменты времени, совпадающие с выбором нейронной сети)
 Comparison of detected ramps using the algorithm with expert selection for the image base (time moments coinciding with the neural network selection are marked in bold)

<i>t</i> , 10 ⁻² , с								
0	150	225	290	400	500	700	1150	1200
1450	1625	1800	1970	2120	2430	2620	2790	2845
3020	3130	3440	3510	3585	3630	3680	3715	3760
3840	4000	4075	4220	4325	4360	4515	4700	4750
4860	4885	5115	5200	5270	5470	5600	5730	5950
6080	6260	6420	6500	6710	6915	7090	7190	7300
7330	7445	7580	7690	7805	8000	8150	8280	8478
8530	8810	8880						

Заключение

Конвективные движения над нагретой поверхностью отмечаются чередованием подъемов разных объемов прогретого воздуха. Под влиянием ветра эти тепловые структуры приобретают несимметричную форму (подобно пламени свечи на ветру). Соответственно, при фиксации данных, когда эти структуры переносятся ветром через измерительный датчик, отмечаются треугольные несимметричные сигналы, называемые рэмпам. Их число и амплитуда определяют свойства теплового потока. Значительные объемы данных пульсационных высокочастотных измерений требуют автоматизации процесса их обработки с целью поиска и исследования свойств таких структур.

Для анализа исходных данных измерений температуры с частотой 1000 Гц применены два метода: алгоритмический и нейросетевой.

Первый метод основан на статистической обработке данных с последующей фильтрацией в соответствии с конкретным алгоритмом.

Второй метод предполагает представление рэмп-структур в виде двумерных массивов по типу изображений. Далее решается задача распознавания образов с применением нейронной сети. Построена база образов, в которой помимо исходных данных имеются разностные значения величин с разным шагом по аналогии с использованием построения структурных функций. На первом этапе бралась пара исходный сигнал и минимальное смещение. Обучение двухслойной нейронной сети на относительно небольшой базе изображений (около 1000) дает ошибку 12 %.

Применение алгоритмического метода позволяет при подобранных параметрах определять рэмп-структуры определенного размера, зависящего от исходных параметров. Нейронная сеть позволяет определять рэмп-структуры трех типов: вершинами вверх, вершинами вниз и не являющиеся рэмпам.

При сравнении с алгоритмическим методом выявлено, что нейронная сеть выбирает в три раза больше рэмп-структур, включая выбранные первым методом, а также большинство рэмпов из базы образов. Также появляются новые мелкие рэмпы с временной длительностью около 0,1 с. Нейронная сеть отработала в тестовом режиме с ограниченным функционалом и небольшой базой образов, но понятно, что в целом она применима для поиска рэмпов.

Использование подобных методик анализа больших данных необходимо для изучения пространственной структуры теплового потока. Определение рэмп-структур позволит использовать автоматизацию процессов обработки больших объемов высокочастотных измерений и получения данных об их статистических распределениях по размерам и интенсивности, необходимых для оценок интенсивности и скорости вертикального выноса пылевого аэрозоля с аридных и субаридных территорий.

Список литературы

1. Krishnamurti R., Howard L. N. Large-scale flow generation in turbulent convection // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1981. Vol. 78(4). P. 1981—1985. doi: 10.1073/pnas.78.4.198.

2. Chkhetiani, O. G., Gledzer, E. B., Artamonova, M. S., Iordanskii, M. A. Dust Resuspension under Weak Wind Conditions: Direct Observations and Model // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012. V. 12(11). P. 5147—5162. doi: 10.5194/acp-12-5147-2012.
3. Garai A., Pardyjak E., Steeneveld G. et al. Surface temperature and surface-layer turbulence in a convective boundary layer // *Boundary-layer meteorology*. 2013. V. 148. P. 51—72. doi: 10.1007/s10546-013-9803-4.
4. Frisch A. S., Businger J. A. A study of convective elements in the atmospheric surface layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 1973, V. 3(3). P. 301—328. doi: 10.1007/BF00736183.
5. Малиновская Е. А., Чхетиани О. Г., Голицын Г. С., Лебедев В. А. О вертикальном распределении пылевого аэрозоля в условиях слабых и умеренных ветров // *Доклады Академии Наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 509. Вып. 2. С. 250—258. doi: 10.31857/S0002351523050085.
6. Koprov B. M., Zubkovsky S. L., Koprov V. M. et al. Statistics of air temperature spatial variability in the atmospheric surface layer // *Boundary-layer meteorology*. 1998, V. 88(3). P. 399—423. doi: 10.1023/A:1001517403557.
7. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Azizyan G. V. On the Structure of Temperature Pulsations near the Surface under Convective Conditions // *Doklady Earth Sciences*. 2024. V. 516(1). P. 888—895. doi: 10.1134/S1028334X24601159.
8. Snyder R. L., Spano D., Pawu K. T. Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density // *Boundary-Layer Meteorology*. 1996. V. 77. C. 249—266. doi: 10.1007/BF00123527.
9. Zhou S. Q., Xie Yi.Ch., Sun Ch. et al. Statistical characterization of thermal plumes in turbulent thermal convection // *Physical Review Fluids*. 2016. V.1(5). P. 054301. doi: 10.1103/PhysRevFluids.1.054301.
10. Сирота А. А., Митрофанова Е. Ю., Милованова А. И. Анализ алгоритмов поиска объектов на изображениях с использованием различных модификаций сверточных нейронных сетей // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2019. № 3. С. 123—137. doi: 10.17308/sait.2019.3/1313.
11. Egmont-Petersen M., de Ridder D., Handels H. Image processing with neural networks—a review // *Pattern recognition*. 2002. № 35(10). P. 2279—2301. doi: 10.1016/S0031-3203(01)00178-9.
12. Aguilar-Fuertes J. J., Noguero-Rodriguez F., Jaen Ruiz J. C. et al. Tracking turbulent coherent structures by means of neural networks // *Energies*. 2021. № 14(4). P. 984—998. doi: 10.3390/en14040984.
13. Wan R., Mei Sh., Wang J. et al. Multivariate temporal convolutional network: A deep neural networks approach for multivariate time series forecasting // *Electronics*. 2019. №8.8. P. 876—894. doi: 10.3390/electronics8080876.
14. Mikhaylov K., Rigopoulos S., Papadakis G. Three-dimensional characterisation of macro-instabilities in a turbulent stirred tank flow and reconstruction from sparse measurements using machine learning methods // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. №196. P. 276—296. doi: 10.1016/j.cherd.2023.06.044.
15. Schmekel D., Alcántara-Ávila F., Hoyas S. et al. Predicting coherent turbulent structures via deep learning // *Frontiers in Physics*. 2022. №10. P. 888832. doi: 10.3389/fphy.2022.888832.
16. Ростовцев В. С. Искусственные нейронные сети. Киров: Изд-во ВятГУ, 2014. 208 с.

References

1. Krishnamurti R., Howard L. N. Large-scale flow generation in turbulent convection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1981; 78(4): 1981—1985. doi: 10.1073/pnas.78.4.198.
2. Chkhetiani O. G., Gledzer E. B., Artamonova M. S., Iordanskii M. A. Dust Resuspension under Weak Wind Conditions: Direct Observations and Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012; 12(11):5147—5162. doi: 10.5194/acp-12-5147-2012.
3. Garai A., Pardyjak E., Steeneveld G. et al. Surface temperature and surface-layer turbulence in a convective boundary layer. *Boundary-layer meteorology*. 2013; 148: 51—72. doi: 10.1007/s10546-013-9803-4.
4. Frisch A. S., Businger J. A. A study of convective elements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*. 1973; 3(3). 301—328. doi: 10.1007/BF00736183.
5. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Golistyn G. S., Lebedev V. A. Stability of the Vertical Distribution of Dust Aerosol in Light and Moderate Winds. *Doklady Akademii Nauk. Nauki o Zemle = Izvestiya*,

- Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023; 59(5):(623—634). doi: 10.31857/S0002351523050085. (In Russ.).
6. Koprov B. M., Zubkovsky S. L., Koprov V. M. et al. Statistics of air temperature spatial variability in the atmospheric surface layer. *Boundary-layer meteorology*. 1998; 88(3). 399—423. doi: 10.1023/A:1001517403557.
 7. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Azizyan G. V. On the Structure of Temperature Pulsations near the Surface under Convective Conditions. *Doklady Earth Sciences*. 2024; 516(1): (888—895). doi: 10.1134/S1028334X24601159.
 8. Snyder R. L., Spano D., Pawu K. T. Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density. *Boundary-Layer Meteorology*. 1996; 77: 249—266. doi: 10.1007/BF00123527.
 9. Zhou S. Q., Xie Yi.Ch., Sun Ch. et al. Statistical characterization of thermal plumes in turbulent thermal convection. *Physical Review Fluids*. 2016; 1(5). 054301. doi: 10.1103/PhysRevFluids.1.054301.
 10. Sirota A. A., Mitrofanova E. Yu., Milovanova A. I. Analysis of algorithms for searching objects in images using different modifications of convolutional neural networks. *Vestnik VSU. Series: System Analysis and Information Technologies*. 2019;(3):(123—137). (In Russ.). doi: 10.17308/sait.2019.3/1313.
 11. Egmont-Petersen M., de Ridder D., Handels H. Image processing with neural networks—a review. *Pattern recognition*. 2002; 35(10). 2279—2301. doi: 10.1016/S0031-3203(01)00178-9.
 12. Aguilar-Fuertes J. J., Noguero-Rodriguez F., Jaen Ruiz J. C. et al. Tracking turbulent coherent structures by means of neural networks. *Energies*. 2021; 14(4): 984—998. doi: 10.3390/en14040984.
 13. Wan R. Mei Sh., Wang J. et al. Multivariate temporal convolutional network: A deep neural networks approach for multivariate time series forecasting. *Electronics*. 2019; (8.8):(876—894). doi: 10.3390/electronics8080876
 14. Mikhaylov K., Rigopoulos S., Papadakis G. Three-dimensional characterisation of macro-instabilities in a turbulent stirred tank flow and reconstruction from sparse measurements using machine learning methods. *Chemical Engineering Research and Design*. 2023; (196):(276—296). doi: 10.1016/j.cherd.2023.06.044
 15. Schmekel D., Alcántara-Ávila F., Hoyas S. et al. Predicting coherent turbulent structures via deep learning. *Frontiers in Physics*. 2022; 10. 888832. doi: 10.3389/fphy.2022.888832.
 16. Rostovtsev V.S. *Iskusstvennye neyronnye seti = Artificial neural networks*. Kirov: Izd-vo VyatSU. 2014. 208 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Малиновская Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, лаборатория геофизической гидродинамики, ст. научный сотрудник, elen_am@inbox.ru.

Калинин Савелий Дмитриевич, Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра высшей математики и физики, студент; Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, лаборатория геофизической гидродинамики, стажер-исследователь, fixinit8@yandex.ru.

Зайцева Ирина Владимировна, кандидат физико-математических наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра высшей математики и физики, зав. кафедрой.; Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, лаборатория геофизической гидродинамики, ведущий математик, ziki@mail.ru.

Information about authors

Malinovskaya Elena Alexandrovna, Candidate of Physics and Mathematics, A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geophysical Hydrodynamics, Senior Researcher.

Kalinin Saveliy Dmitrievich, Russian State Hydrometeorological University, Department of Higher Mathematics and Physics, student; A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geophysical Hydrodynamics, Research Intern.

Е. А. МАЛИНОВСКАЯ, С. Д. КАЛИНИН, И. В. ЗАЙЦЕВА

Zaitseva Irina Vladimirovna, Candidate of Physics and Mathematics, Russian State Hydrometeorological University, head of department, Department of Higher Mathematics and Physics; A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geophysical Hydrodynamics, Leading Mathematician.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.07.2024

Принята к печати 28.08.2024

The article was received on 12.07.2024

The article was accepted on 28.08.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 422—436.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):422—436.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.515.1:551.551]:004.94
doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-422-436

Влияние релаксационных методов ассимиляции на воспроизведение поля скорости ветра в полярном циклоне

***Всеволод Сергеевич Коляда¹, Павел Андреевич Голубкин^{1,2},
Юлия Ефимовна Смирнова¹***

¹ Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия, jostersplus@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена использованию методов ассимиляции данных для воспроизведения полярных циклонов атмосферной моделью WRF. Метод четырехмерной ассимиляции данных (FDDA) позволяет ассимилировать данные атмосферного реанализа ERA5, а также спутниковые наблюдения скаттерометров ASCAT. Всего было проведено три численных эксперимента, в которых показано влияние каждого компонента ассимиляции на получаемое поле ветра в одном и том же полярном циклоне. Полученные результаты показывают, что используемый метод ассимиляции данных улучшает оценку максимальных скоростей ветра в циклоне и предоставляет возможность более детально проследить его развитие.

Ключевые слова: полярный циклон, численное моделирование, ассимиляция данных, релаксационные методы ассимиляции, Северо-Европейский бассейн.

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 22-27-00701.

Для цитирования: Коляда В. С., Голубкин П. А., Смирнова Ю. Е. Влияние релаксационных методов ассимиляции на воспроизведение поля скорости ветра в полярном циклоне // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 422—436. doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-422-436.

Original article

Influence of the four-dimensional data assimilation on the reproduction of polar low wind speed field

*Vsevolod S. Kolyada¹, Pavel A. Golubkin^{1,2},
Julia E. Smirnova¹*

¹ Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Summary. In this study three numerical experiments were performed to assess the influence of the four-dimensional data assimilation (FDDA) technique on the resulting polar low wind speed field configuration and their results were compared to the ASCAT satellite scatterometer and the ERA5 atmospheric reanalysis data. The experiments were conducted using the Weather Research and Forecasting (WRF) model with no data assimilation (first) and using FDDA with ERA5 data (second), and ERA5 and ASCAT data (third). ERA5 data were used as initial and boundary conditions for all model runs. The FDDA usage was shown to remarkably improve the resulting polar low wind speed fields yielding better correspondence to the satellite wind speeds in both magnitude and shape. In particular, the maximum wind speed area was localized in the right-hand side of the polar low further than 100 km from its center during the first experiment, while the scatterometer data indicated localization of this area within 50 km from the polar low center in its rear part. Wind speed fields calculated during the second and third runs (with FDDA) closely resemble this configuration. The highest wind speed values found during the third model run (23—25 m/s) are closer to the ASCAT scatterometer data (24 m/s) compared to those obtained during the second model run (21 m/s). While only single polar low was modelled in this study, the improvements introduced by the FDDA usage are assumed to be robust. As such, modelling with FDDA offers the advantages of both reanalysis (full spatial and temporal coverage) and satellite scatterometer (more accurate) data as well as higher spatial resolution (e.g., 3×3 km² grid used in this study compared to 0.25°×0.25° for ERA5 and 12.5×12.5 km² for ASCAT data), which enables better identification of small-scale areas with the highest values of wind speed within a polar low. This technique may therefore be used for forecasting of polar low formation and evolution as well as for more accurate risk assessment in polar low situations.

Keywords: polar low, numerical modelling, four-dimensional data assimilation, nudging, WRF, Nordic seas.

Acknowledgments: the study was conducted in frame of the Russian Science Foundation Project No 22-27-00701.

For citation: Kolyada V. S., Golubkin P. A., Smirnova J. E. Influence of the four-dimensional data assimilation on the reproduction of polar low wind speed field. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):422—436. (In Russ.). doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-422-436.

Введение

Полярные циклоны — интенсивные мезомасштабные атмосферные вихри, которые характерны для полярных регионов обоих полушарий Земли. С прохождением полярного циклона связаны такие опасные явления, как снижение видимости, обледенение судов, штормовые скорости ветра (до 33 м/с), интенсивные осадки, сильное ветровое волнение (свыше 8 м), высокие градиенты скорости ветра [1—4]. Все это представляет опасность не только для деятельности в открытом океане, но и для прибрежных инженерных сооружений.

Полярные циклоны остаются малоизученными явлениями по сравнению, например, с тропическими, исследования которых продолжаются более века. В первую очередь это связано с гораздо большей опасностью для населения, которую представляют тропические циклоны, обычно выходящие на берег в густонаселенных районах. Во-вторых, это связано с тем, что полярные циклоны наблюдаются в относительно удаленных полярных районах, где наблюдательная сеть имеет редкое покрытие. Полярные циклоны имеют в среднем размер около 300 км [5] и малое время существования, что не позволяет их отслеживать по синоптическим картам, поэтому до наступления эры спутниковых наблюдений о них было известно крайне мало.

В настоящее время основным инструментом мониторинга циклонов являются спутниковые данные, в частности, изображения в инфракрасном диапазоне, которые позволяют отслеживать формирование и развитие циклона, отмечать его центр и определять облачную структуру. Одним из регионов, где полярные циклоны формируются наиболее часто, является Северо-Европейский бассейн, который включает в себя Норвежское, Баренцево и Гренландское моря. В этом регионе в среднем за год образуется около 15—20 циклонов, причем наиболее часто это происходит с февраля по апрель, а продолжительность их существования чаще всего не превышает 36 ч [5].

Для оценки опасности, представляемой полярными циклонами, а также их влияния на морскую поверхность важным параметром является поле скорости ветра и его конфигурация в циклоне. Скорость ветра в циклонах обычно оценивается на основе данных спутниковых скаттерометров и атмосферных реанализов. Данные скаттерометров имеют ряд преимуществ перед данными реанализов. В частности, у них выше пространственное разрешение, а также точность, особенно при быстрой эволюции поля ветра, характерной для условий формирования и развития полярных циклонов. Однако покрытие наблюдениями непостоянно, иногда наблюдения невозможны в силу атмосферных условий, и один циклон может попасть в полосу обзора спутника лишь один-два раза, что не позволяет полноценно исследовать развитие поля ветра в циклоне. Основное преимущество реанализов состоит в том, что они предоставляют полное покрытие региона с высоким (до ежечасного) временным разрешением. К недостаткам относится невысокое пространственное разрешение, а также занижение скорости ветра по отношению к данным скаттерометров [6—8]. Кроме того, не все полярные циклоны воспроизводятся в атмосферных реанализах в силу своих небольших размеров и времени существования, а также сложных физических механизмов их образования. Использование методов численного моделирования с ассимиляцией спутниковых данных может представить преимущества обоих описанных выше типов данных для получения наиболее детальных полей скорости ветра в полярных циклонах.

Целью данной работы является оценка влияния применения релаксационных методов ассимиляции данных при численном моделировании полярного циклона на результирующее поле скорости ветра. Для этой цели было произведено три численных эксперимента с использованием атмосферной модели Weather Research

and Forecasting (WRF), результаты которых сравнивались с данными атмосферного реанализа European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis 5 (ERA5) и данными спутниковых скаттерометров Advanced Scatterometer (ASCAT).

Исходные данные и методология

Исследуемый полярный циклон

Рассматривался полярный циклон в акватории Норвежского и Баренцева морей за период 04.03.2013 03:00 — 05.03.2013 03:00 (UTC), продолжительность существования которого составила около 24 ч. На рис. 1 представлена траектория движения полярного циклона, начальное (черный круг) и конечное положение его центра. Общее направление движения циклона — с запада на восток. Расстояние, пройденное циклоном, составило около 500 км, скорость его перемещения оставалась практически неизменной в течение всего периода существования и составила около 20 км/ч.

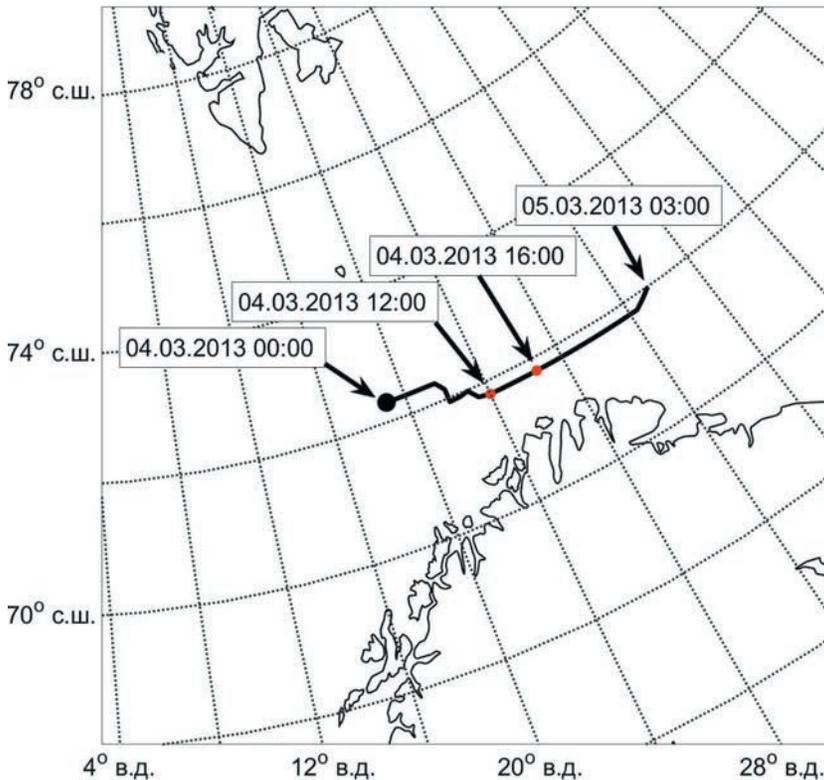


Рис. 1. Траектория движения полярного циклона.

Fig. 1. Track of the polar low.

Микроволновые скаттерометры ASCAT

Нами были использованы данные скаттерометров ASCAT, установленных на спутниках MetOp-A,B, которые находятся на солнечно-синхронной орбите. У каждого прибора имеется две полосы сканирования шириной 550 км, пространственное разрешение составляет $12,5 \times 12,5$ км [9]. Уровень обработки — L2. Период функционирования MetOp-A был с 19.10.2006 г. по 15.11.2021 г., а MetOp-B с 17.09.2012 г. — по настоящее время. Используемые переменные — скорость и направление ветра на высоте 10 м над водной поверхностью. Описанные переменные использовались в процессе ассимиляции данных. Для ассимиляции и последующего расчета ошибок время всех измерений округлялось до ближайшего часа (к 07:00, 08:00, 09:00 и т. д.). Всего за период численного эксперимента было ассимилировано 26 проходов спутника, в каждом из которых имелось 500—5000 наблюдений за скоростью и направлением ветра.

Атмосферный реанализ ERA5

Пространственное разрешение составляло $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, временное разрешение — 1 час, покрытие — глобальное [10]. Данные реанализа использовались для определения начальных и граничных условий для модели WRF, а также при ассимиляции данных.

Атмосферная модель WRF

Для расчетов использовалась модель WRF, версия 4.4.2. Исходные данные и граничные условия для запуска модели задавались при помощи данных атмосферного реанализа ERA5. Частота задания граничных условий — 3 ч. Пространственное разрешение родительского домена 15×15 км, вложенный домен 3×3 км, метод расчета во вложенном домене — «two-way nested». Модель имела 42 вертикальных уровня с гибридной системой координат. Для параметризации атмосферных процессов использовались следующие схемы:

- Microphysics – WDM6 [11];
- Shortwave & longwave atmospheric radiation – RRTMG [12];
- Cumulus – Kain-Fritsh scheme [13] для 15 км, отключена для 3 км;
- Planetary Boundary Layer (PBL) – Mellor-Yamada-Janjic scheme [14];
- Surface layer – Monin-Obukhov scheme [15].

Также для обоих доменов использовался метод четырехмерной ассимиляции данных, который включал в себя ассимиляцию данных ERA5 (только выше PBL) и скаттерометров ASCAT.

Методология ассимиляции данных

В данной работе использовался метод четырехмерной ассимиляции данных (Four Dimensional Data Assimilation; FDDA), который также носит название релаксационных методов ассимиляции или метод наджинга. Релаксационные методы ассимиляции представляют собой аддитивный член в уравнении для той или иной переменной, вычисляемой в численной модели [15].

Представим общий вид уравнения для одной из переменных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = F(\theta) + G_0 W_0 (\theta_0 - \theta), \quad (1)$$

где θ — результирующая величина переменной, $F(\theta)$ — полное выражение для вычисления величины переменной, G_0 — коэффициент силы наджинга, W_0 — весовой коэффициент наджинга, θ_0 — пространственно- и временно-интерполированная величина переменной по данным, которые ассимилируются.

Из уравнения (1) видно, что на результирующую величину переменной линейно влияет коэффициент силы наджинга, а также его весовой коэффициент. Коэффициент силы воздействия задается исследователем, весовой коэффициент вычисляется в модели и зависит от расстояния от точки, в которой производятся вычисления, до точки наблюдений ассимилируемых данных.

В данной модели существует разделение релаксационных методов ассимиляции на две составляющие. Первая из них — сеточный наджинг. Сеточный наджинг позволяет ассимилировать данные, которые являются входными для модели (т. е. из которых создаются граничные и начальные условия). Вторая составляющая — поверхностный наджинг. Поверхностный наджинг позволяет ассимилировать данные наблюдений, например температуры воздуха, влажности, скорости и направления ветра на метеорологической станции, в том числе данные о скорости и направлении ветра, полученные дистанционными методами.

Обычно сеточные методы релаксации используются для того, чтобы решение, получаемое по модели, не могло сильно удалиться от исходных данных, а величина коэффициента наджинга определяет, насколько сильно будет воздействие ассимилируемых данных на решение модели. Чем выше коэффициент, тем сильнее воздействие, тем ближе решение по модели WRF будет к ассимилируемым данным. В данном исследовании коэффициент сеточного наджинга составлял $G_0 = 0,0001$ 1/с, что можно характеризовать как слабый наджинг, поэтому наджинг использовался только выше уровня PBL.

Поверхностный наджинг обычно используется для того, чтобы ассимилировать различные метеорологические параметры. В данном случае были ассимилированы данные скаттерометров о скорости и направлении ветра на высоте 10 м над поверхностью океана. Коэффициент поверхностного наджинга составил $G_0 = 0,0003$ 1/с, что можно характеризовать как умеренный наджинг.

Описание численного эксперимента и запуск модели WRF

В данной работе исследовался один полярный циклон. Общая схема запуска модели может быть представлена в следующем порядке:

1. Определение даты начала и окончания расчета модели WRF. Дата начала расчета связана со временем начала циклона, от которого отнимается 12 часов. Дата окончания расчета равняется дате окончания циклона. Таким образом, период расчета составил 03.03.2013 15:00 UTC — 05.03.2013 03:00 UTC (36 ч).

2. Создание расчетной области (родительского домена) с разрешением 15×15 км и вложенной сетки с разрешением 3×3 км. Вложенная сетка полностью

покрывает область, где находился циклон за время своего существования. Размер этой области составил 1140×900 км, что позволило определять скорости ветра в циклоне в радиусе 300 км от центра циклона в каждый момент времени.

3. Определение начальных и граничных условий для обоих доменов (15 и 3 км) по данным атмосферного реанализа ERA5.

4. Ассимиляция данных реанализа и скаттерометров на всем периоде расчета WRF.

5. Запуск модели в заданном периоде времени.

Для того, чтобы определить степень влияния релаксационных методов ассимиляции на получаемые результаты, было произведено несколько запусков модели с различными условиями. Каждый запуск начинался и заканчивался в одно и то же время и длился 36 часов, с 03.03.2013 15:00 UTC по 05.03.2013 03:00 UTC, причем размер и конфигурация доменов сохранялась, начальные и граничные условия для всех трех запусков были получены из данных реанализа ERA5. При сеточном наджинге были ассимилированы компоненты скорости ветра, влажности и температуры, а при поверхностном только компоненты скорости ветра.

Первый численный эксперимент — контрольный. Для него использованы только данные ERA5 для создания начальных и граничных условий, частота задания граничных условий равняется 3 часа.

Второй эксперимент — с использованием сеточного наджинга. В процессе расчета выполнялась ассимиляция данных ERA5.

Третий эксперимент — с использованием сеточного и поверхностного наджинга. В процессе расчета производилась ассимиляция данных реанализа ERA5 и данных скаттерометров ASCAT.

Результаты

В данном разделе представлено сравнение скорости ветра в полярном циклоне по результатам трех численных экспериментов, а также скорости ветра по данным атмосферного реанализа ERA5 и скаттерометрам ASCAT.

Скорости ветра по данным скаттерометра

На рис. 2 дается распределение вектора скорости ветра в полярном циклоне по данным скаттерометров ASCAT в два момента времени. На изображениях центр циклона отмечен красной точкой. Видно, что максимальные скорости ветра достигают 23 м/с, а области высоких скоростей ветра находятся в тыловой части циклона в пределах 50 км от его центра. Во фронтальной части циклона наблюдаются зоны низких скоростей ветра, вплоть до 5 м/с и ниже.

Скорости ветра по данным ERA5

На рис. 3 показана конфигурация полей ветра по данным атмосферного реанализа. Видно, что поле скорости ветра имеет схожую конфигурацию с данными

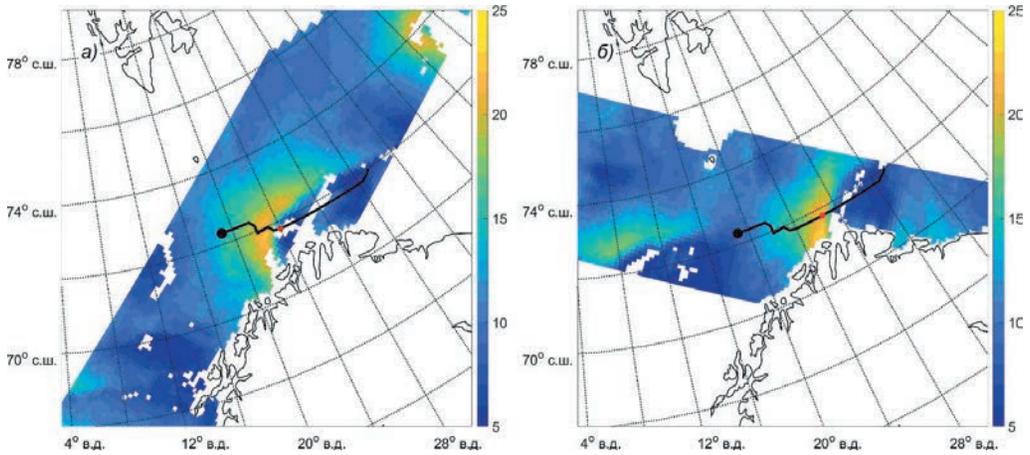


Рис. 2. Конфигурация поля скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне по данным скаттерометра ASCAT.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 2. ASCAT 10 m wind speed field configuration within the polar low.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

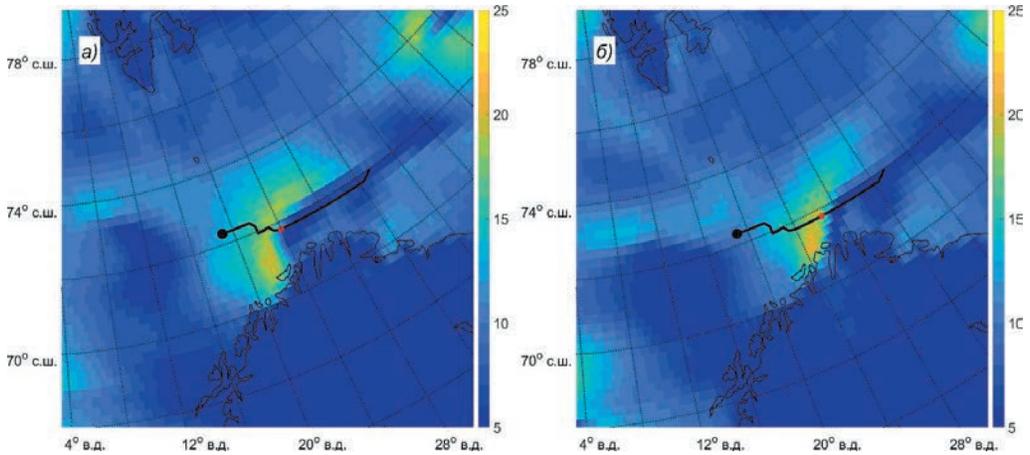


Рис. 3. Конфигурация поля скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне по данным реанализа ERA5.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 3. ERA5 10 m wind speed field configuration within the polar low.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

скаттерометров, высокие скорости ветра также находятся в тыловой части циклона, однако их максимальные значения меньше, чем по данным ASCAT, и достигают около 21 м/с.

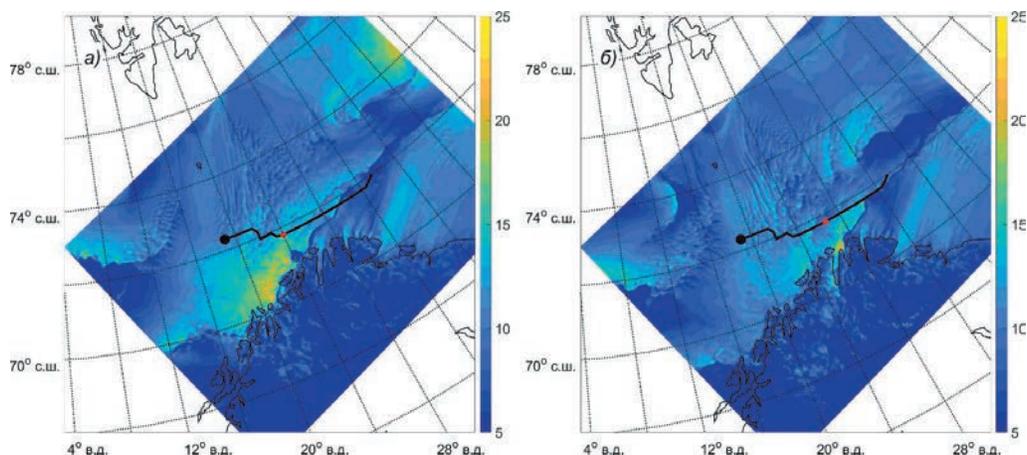


Рис. 4. Поле скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне при контрольном эксперименте.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 4. 10 m wind speed within the polar low for the control model run.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Контрольный численный эксперимент

На рис. 4 показана конфигурация полей ветра по данным модели WRF при контрольном запуске, т. е. без ассимиляции каких-либо данных, в сетке с разрешением 3×3 км. Для момента времени 12:00 UTC видна область высоких скоростей ветра, она находится справа по ходу движения циклона на расстоянии от центра циклона свыше 100 км, а максимальные значения в ней достигают около 23 м/с. В момент времени 16:00 UTC поле скорости ветра не имеет ярко выраженной области высоких значений, величины максимальных скоростей едва превышают 16—17 м/с.

Второй модельный эксперимент с ассимиляцией данных ERA5

На рис. 5 показана конфигурация полей ветра по данным модели WRF при втором запуске, т. е. при ассимиляции данных ERA5 в сетке с разрешением 3×3 км. Области высоких скоростей ветра расположены в тыловой части циклона, максимальные скорости достигают около 20 м/с, конфигурация поля ветра близка к той, которую можно видеть на рис. 3, где показано поле ветра по ERA5.

Третий модельный эксперимент с ассимиляцией данных ERA5 и скаттерометров ASCAT

На рис. 6 показана конфигурация полей ветра по данным модели WRF при третьем запуске, т. е. при ассимиляции данных ERA5 и скаттерометров в сетке с разрешением 3×3 км. Максимальные скорости ветра в 12:00 UTC и 16:00 UTC

достигают около 23 м/с, области высоких скоростей ветра хорошо согласуются с данными ASCAT.

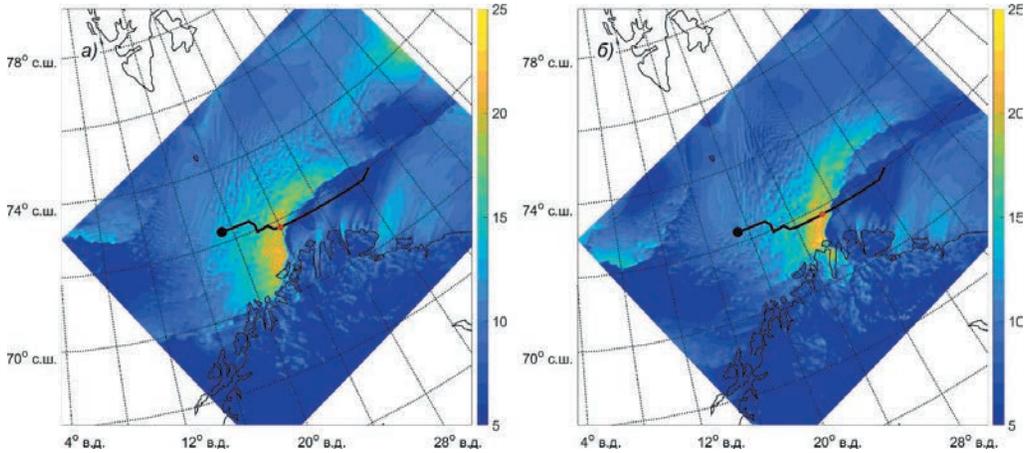


Рис. 5. Поле скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне при втором модельном эксперименте.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 5. 10 m wind speed within the polar low for the second model run.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

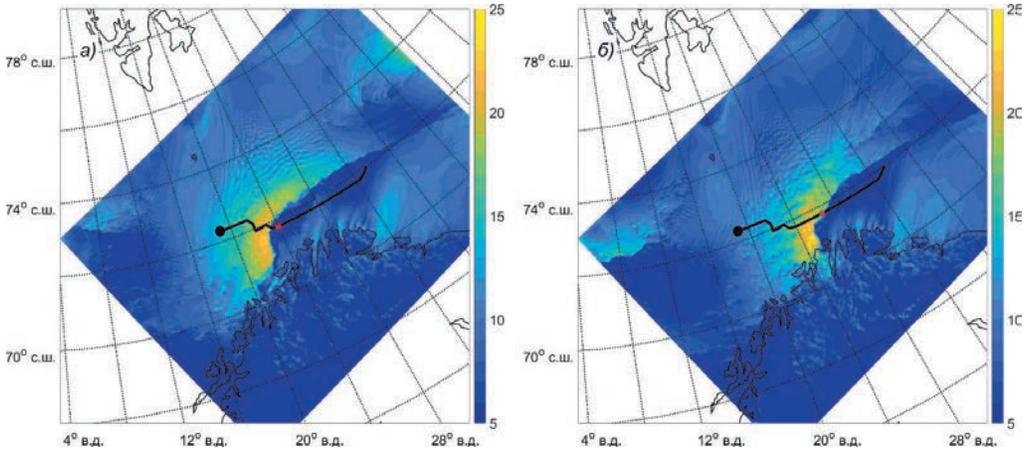


Рис. 6. Поле скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне при третьем модельном эксперименте.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 6. 10 m wind speed within the polar low for the third model run.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Сравнивая между собой конфигурацию поля ветра, максимальные скорости ветра и их локализацию, во всех случаях (рис. 2—6) наблюдаются следующие закономерности:

— поле ветра по данным ERA5 имеет схожую структуру по сравнению с данными скаттерометров ASCAT;

— максимальные скорости ветра в ERA5 ниже (около 20 м/с), чем по данным ASCAT (24 м/с);

— конфигурация поля ветра в первом эксперименте сильно отличается от поля ветра по данным скаттерометров;

— максимальные скорости ветра в первом эксперименте ниже (20 м/с), чем по данным скаттерометров (24 м/с);

— для второго и третьего эксперимента поле ветра имеет схожую структуру с данными ASCAT;

— максимальные скорости ветра для третьего эксперимента достигают 23—25 м/с, что наиболее близко к максимальным скоростям ветра по данным ASCAT и показывает высокую степень усвоения данных.

Для оценки величины отклонения скорости ветра от данных скаттерометров была рассчитана среднеквадратическая ошибка (RMSE), формула (2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_m - y_a)^2}, \quad (2)$$

где n — количество наблюдений, y_m — скорость ветра по данным численного эксперимента или реанализа, y_a — скорость ветра по данным скаттерометров. Таким образом, была рассчитана ошибка для трех численных экспериментов и для реанализа ERA5.

На рис. 7 показано распределение ошибки в течение периода существования циклона для всего вложенного домена. Как видно, для первого эксперимента ошибка в течение всего периода существования циклона находится в диапазоне 2,5—3,5 м/с, для второго и третьего эксперимента ошибка находится в диапазоне 1,5—2,5 м/с, однако для третьего эксперимента средняя ошибка ниже (2,0 м/с), чем для второго (2,15 м/с). Наименьшая ошибка наблюдается по данным ERA5, она находится в диапазоне 1,25—2,50 м/с, её средняя величина составляет 1,7 м/с. Таким образом, общая величина ошибки (для всего рассматриваемого региона) по модельным результатам находится приблизительно на одном уровне с данными реанализов, но при этом высокие значения скорости ветра в циклонах существенно ближе к данным спутниковых скаттерометров.

Кроме того, для данных скоростей ветра была построена диаграмма Тейлора (рис. 8). Хорошо видно, что каждый последующий эксперимент улучшал общую оценку скорости ветра относительно данных скаттерометров, при этом наилучшая оценка наблюдается по реанализу. Это можно объяснить тем, что данные реанализа и скаттерометра более «гладкие» по сравнению с результатами моделирования, имеющими существенно более высокое пространственное разрешение, а также погрешностью, вызванной округлением времени измерений ASCAT до целого часа при ассимиляции данных. При рассмотрении же максимальных скоростей

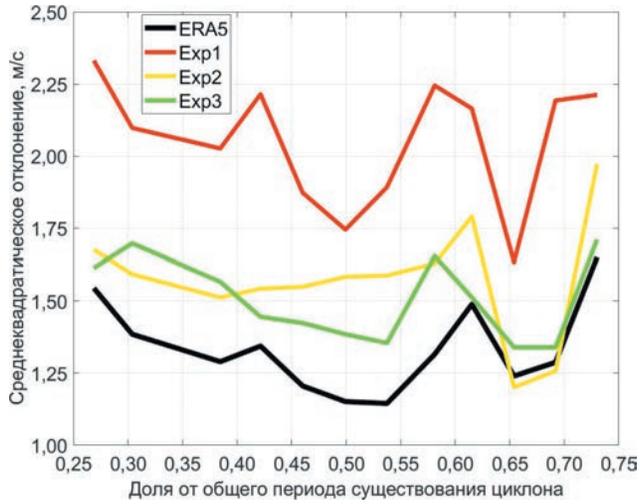


Рис. 7. Оценки среднеквадратической ошибки (RMSE) для трех численных экспериментов (Exp1, Exp2, Exp3) и реанализа ERA5 (минимальное количество наблюдений скорости ветра $n \geq 300$).

Fig. 7. Root mean square error (RMSE) for the three numeric data experiments (Exp1, Exp2, Exp3) and ERA5 reanalysis (minimal quantity of wind speed observations $n \geq 300$).

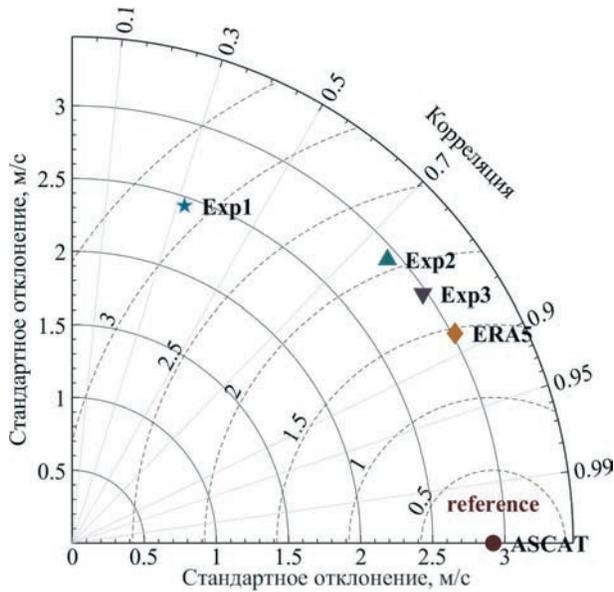


Рис.8. Диаграмма Тейлора для трех численных экспериментов и реанализа ERA5 относительно данных ASCAT.

Fig. 8. Taylor's diagram for three numerical experiments and ERA5 reanalysis against ASCAT data.

ветра в циклоне в различные моменты времени наилучшие оценки наблюдаются при третьем и втором экспериментах, а наихудшие по данным реанализа и при первом эксперименте (табл. 1).

Таблица 1

Максимальные скорости ветра в полярном циклоне в разные моменты времени (м/с)
Maximum wind speeds within the analyzed polar low at different times (m/s)

Дата и время	ASCAT	ERA5	Exp1	Exp2	Exp3
04.03.2013 08:00	19,7	19,0	21,8	21,0	19,8
04.03.2013 09:00	21,0	19,6	21,2	19,4	21,1
04.03.2013 12:00	22,1	19,7	21,6	21,9	22,9
04.03.2013 16:00	22,7	20,4	20,8	23,9	23,8

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, наиболее близкие к данным ASCAT.

Заключение

В результате трех численных экспериментов было рассчитано поле скорости ветра для полярного циклона в акватории Норвежского и Баренцева морей. Было показано, что релаксационные методы ассимиляции позволяют улучшить оценку максимальных скоростей ветра, а также получить конфигурации полей ветра, которые хорошо согласуются с данными скаттерометров ASCAT.

Так, для первого эксперимента области высоких значений скорости ветра локализованы справа по ходу движения циклона на расстоянии свыше 100 км от центра, в то время как по данным скаттерометров эти области расположены в тыловой части циклона на расстоянии до 50 км от центра. Сама область высоких значений скорости ветра в первом эксперименте сильно отличается от поля ветра по данным скаттерометров.

Во втором и третьем экспериментах конфигурации поля ветра имеют большое сходство с восстановленными по данным скаттерометра ASCAT. Максимальные скорости ветра в третьем эксперименте (23—25 м/с) ближе к данным ASCAT (24 м/с), чем во втором (21 м/с).

Величина ошибки RMSE для каждого последующего эксперимента снижается, а ошибка по ERA5 имеет наименьшую величину, однако максимальные скорости ветра хуже соотносятся с данными ASCAT, чем для второго и третьего эксперимента.

Следует также отметить, что у модели WRF имеется преимущество в разрешающей способности, которая превосходит реанализ в несколько раз. Так, на широте 70° с.ш. разрешающая способность реанализа составляет около 25×10 км, в то время как разрешение вложенного домена WRF в данной работе составляет 3×3 км. Таким образом, можно с большей точностью определять локализацию области максимального ветра в циклоне.

Максимальные скорости ветра в рассматриваемом случае не превышали 25 м/с. При таких условиях данные ASCAT находятся в хорошем соответствии с данными буйковых станций, хотя и наблюдается небольшое занижение значений

при скоростях более 15 м/с [17]. Для целей данной работы полагаем это занижение несущественным по сравнению с получаемым с их использованием повышением качества полей ветра относительно данных реанализа. При анализе более интенсивных циклонов со скоростями ветра, превышающими 25 м/с, занижение будет более выражено и может потребоваться применение коррекции данных ASCAT (напр., [17]) или использование других доступных данных.

Несмотря на то, что численные эксперименты были проведены только для одного полярного циклона, устойчивое снижение ошибки позволяет предположить высокий потенциал использования четырехмерной ассимиляции данных (FDDA) и для других подобных случаев. Кроме того, применение данного метода ассимиляции данных возможно и при прогнозе формирования и развития полярных циклонов для получения более точных оценок опасности, которую они могут представлять.

References

1. Rasmussen E. A., Turner J. *Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*; Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003; 612 p. doi: 10.1017/CBO9780511524974.
2. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., et al. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. 67(1): 24660. doi: 10.3402/tellusa.v67.24660.
3. Stoll P., Graverson R.G., Noer G., et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018; 144(716): 2099—2117. doi: 10.1002/qj.3309.
4. Kudryavtsev V., Cheshm Siyahi V., Yurovskaya M., Chapron B. On surface waves in arctic seas. *Boundary-Layer Meteorology*. 2023; 187(1): 267—294. doi: 10.1007/s10546-022-00768-9.
5. Smirnova J., Golubkin P., Bobylev P. et al. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data. *Geophysical Research Letters*. 2015; 42(13): 5603—5609. doi: 10.1002/2015GL063865.
6. Belmonte Rivas M., Stoffelen A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. *Ocean Science*. 2019; 15(3): 831—852. doi: 10.5194/os-15-831-2019.
7. Potisomporn P., Adcock T. A. A., Vogel C. R. Evaluating ERA5 reanalysis predictions of low wind speed events around the UK. *Energy Reports*. 2023; (10): 4781—4790. doi: 10.1016/j.egy.2023.11.035.
8. Campos R., Gramscianinov C., de Camargo R. et al. Assessment and calibration of ERA5 severe winds in the atlantic ocean using satellite data. *Remote Sensing*. 2022; 14(19): 4918. doi: 10.3390/rs14194918.
9. Verhoef A., Vogelzang J., Stoffelen A. ASCAT L2 winds data record validation report. *Ocean and Sea Ice SAF Technical Note*, Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, Netherlands. 2016. doi: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0006.
10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020; 146(730): 1999—2049. doi: 10.1002/qj.3803.
11. Lim K. S. S., Hong S. Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*. 2010; 138(5): 1587—1612. doi: 10.1175/2009MWR2968.1.
12. Iacono M. J. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; 113(D13). doi: 10.1029/2008JD009944.
13. Kain J. S. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*. 2004; 43(1): 170—181. doi: 10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
14. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*. 1982; 20(4): 851—875. doi: 10.1029/RG020i004p00851.

15. Monin A. S., Obukhov A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*. 1954; 151(163): e187.
16. Skamarock C., Klemp J., Dudhia J. et al. A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR tech. note*. 2019; (145). doi: 10.5065/1dfh-6p97.
17. Polverari F., Portabella M., Lin W. et al. On high and extreme wind calibration using ASCAT. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021; (60): 1—10. doi: 10.1109/TGRS.2021.3079898.

Информация об авторах

Коляда Всеволод Сергеевич, младший научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», jostersplus@gmail.com.

Голубкин Павел Андреевич, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», доцент кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета, pavel.golubkin@niersc.spb.ru.

Смирнова Юлия Ефимовна, кандидат геогр. наук, научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», julia.smirnova@niersc.spb.ru.

Information about authors

Kolyada Vsevolod Sergeevich, Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Junior Researcher.

Golubkin Pavel Andreevich, PhD (Phys. Math. Sci.), Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Researcher and St. Petersburg University, Associate Professor.

Smirnova Julia Efimovna, PhD (Geogr. Sci.), Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.12.2023

Принята в печать после доработки 30.08.2024

The article was received on 14.12.2023

The article was accepted after revision on 30.08.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 437—450.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):437—450.

Научная статья
УДК 551.502.2:551.508.822:629.7
doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-437-450

О возможности вертикального зондирования атмосферы при помощи мобильного аэрологического комплекса, размещенного на беспилотном летательном аппарате

Валерий Юрьевич Цепелев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, v0010200@mail.ru

Аннотация. Вертикальное зондирование нижней и средней тропосферы, производимое при помощи датчиков, размещенных на беспилотных летательных аппаратах, позволяет с минимальными затратами увеличить плотность аэрологической наблюдательной сети благодаря использованию стандартного сертифицированного оборудования. При этом измерения параметров атмосферы, выполняемые датчиками, размещенными на БПЛА и на радиозондах, неплохо согласуются. К основным преимуществам использования комплекса зондирования, в который входит БПЛА, радиозонд МРЗ-Н1 и компактный радиосканер приема сигнала вместо радиолокатора, относится возможность проводить дешевые учащенные наблюдения пограничного слоя атмосфер в вертикальном столбе воздуха прямо над точкой зондирования. Стоимость эксплуатации такого комплекса примерно в восемь раз меньше, чем традиционной станции аэрологического зондирования.

Ключевые слова: аэрологические наблюдения, радиозонд, беспилотный летательный аппарат, радиосканер.

Для цитирования: Цепелев В. Ю. О возможности вертикального зондирования атмосферы при помощи мобильного аэрологического комплекса, размещенного на беспилотном летательном аппарате // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 437—450. doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-437-450.

Original article

On the possibility of vertical atmospheric sounding with use of mobile aerological complex placed on an unmanned aerial vehicle

Valery Y. Tsepelev

The Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, v0010200@mail.ru

Summary. The use of small UAVs as a platform for meteorological sensors dates back to the early 1960s, but their introduction into operational practice became possible only when cheap and efficient UAVs appeared on the market. UAVs are not only a flexible tool for atmospheric sensing. Their use is more cheaper, than traditional vertical atmospheric sounding methods. The essential argument of transition to UAV measurements is their economic efficiency. The paper presents the concept of a mass, domestic complex of

vertical atmospheric sounding with help of UAVs, which assumes multiple use of the standard radiosonde MP3-H1, which is a standard, certified measuring instrument used on the state aerological observation network, which has the best characteristics from all used radiosondes of the Rosgidromet observation network. Use RTL-SDR radiosonde to replace the expensive station for signal reception and processing. The use of the radiosonde which complete with freely distributed software, for processing and decoding of the radiosonde signal, and construction of the aerological diagram allows to refuse the use of the expensive base station of the radiosonde system “Polyus” and to use an ordinary laptop or smartphone for receiving and decoding sounding data. The possibility of using serial, certified equipment allows to obtain measurement results with the same accuracy as on the regular observational network. A rough estimate of the cost of operating the complex is about 8 times less than the operating cost of a traditional airborne sounding station.

Keywords: atmospheric sounding, radiosonde, Unmanned Aerial platform, radio scanner RTL SDR.

For citation: Tsepelev V.Yu. On the possibility of vertical atmospheric sounding with use of mobile aerological complex placed on an unmanned aerial vehicle. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):437—450. (In Russ.). doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-437-450.

Введение

Для получения информации о вертикальных профилях температуры, влажности, скорости, направлении ветра и давлении воздуха в атмосфере до высот 30—40 километров используются радиозонды, которые поднимаются с помощью специальных латексных шаров, наполняемых лёгким газом — водородом или гелием.

Процесс определения пространственных координат радиозонда осуществляется с помощью измерительных систем. Во многих странах мира используются спутниковые навигационные системы зондирования, но на аэрологической сети Росгидромета преобладают системы, основанные на радиолокационном принципе определения координат. К точности радиозондовых измерений предъявляются требования, сформулированные в документах Всемирной метеорологической организации [1]. Так, например, точность датчиков для измерения температуры в нижних слоях тропосферы не должна превышать 0,5 °С, а измерения относительной влажности должны осуществляться с погрешностью не более 1 %.

Аэрологическая сеть Росгидромета в РФ размещена крайне неравномерно (рис. 1). Если на Европейской территории РФ сеть достаточно плотная, то низкая плотность сети в Арктических районах и в Сибири не позволяет получать необходимую информацию о состоянии тропосферы и стратосферы и, соответственно, улучшать качество численных прогнозов погоды.

По состоянию на декабрь 2022 г. в РФ дважды в сутки, в сроки 00 и 12 мирового времени, производились выпуски радиозондов на 114 аэрологических станциях.

В течение года было выпущено 83 220 штук радиозондов, в комплект которых входит как сам радиозонд, так и латексная оболочка. Для обеспечения выпусков радиозондов было добыто примерно полтора миллиона литров водорода. Основные проблемы отечественного радиозондирования перечислены в документе «Программа и качество наблюдений» за 2022 г., выпущенном Центральной Аэрологической Обсерваторией (ЦАО) и размещенном на сайте http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/list_upperair.htm. Помимо отмеченной недостаточной плотности наблюдательной сети, к этим проблемам также относятся:

- недостаточная точность измерений геопотенциала;
- недостаточная высота зондирования;
- устаревшие датчики температуры и влажности с пониженной точностью измерений;
- практическое отсутствие оборудования, позволяющего определять координаты радиозондов при помощи спутниковых систем глобального позиционирования;
- преобладание на сети опасных способов добывания водорода.

Измерение атмосферного давления, температуры, влажности, скорости ветра и направления ветра в толще атмосферы имеет решающее значение для повышения точности численного прогноза погоды. Но расширение наблюдательной сети зависит не только от решения перечисленных проблем, но и от наличия дополнительного финансирования на ее создание и поддержание.

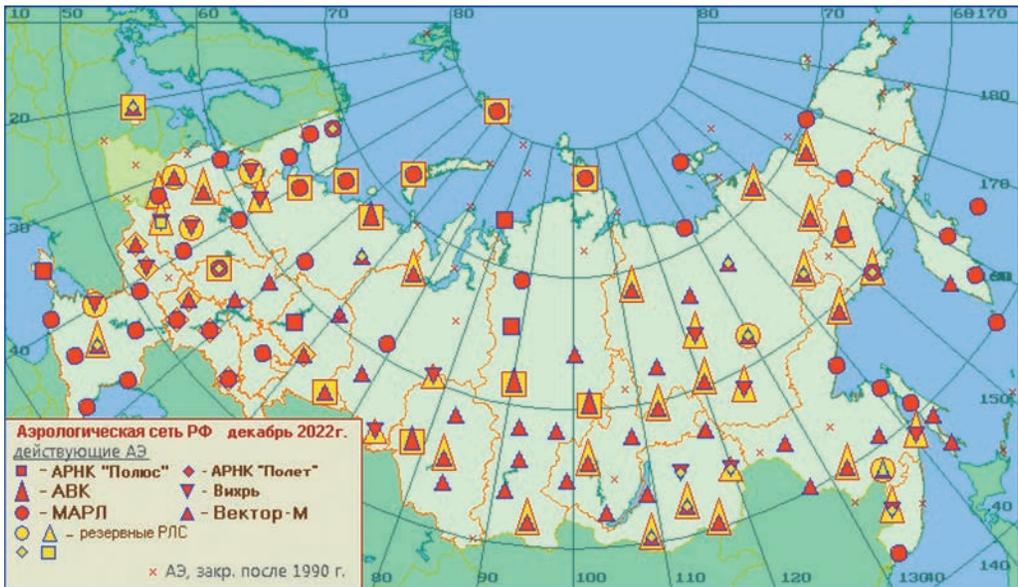


Рис. 1. Карта сети аэрологического зондирования в РФ по состоянию на декабрь 2022 года.

АРНК «Полюс — Аэрологический радионавигационный комплекс; АВК — аэрологический вычислительный комплекс; МАРЛ — малогабаритный аэрологический радиолокатор; «ВЕКТОР-М» — Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс; АРНК «Полет — Аэрологический радионавигационный комплекс; «Вихрь» — Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс; РЛС — Радиолокационная станция; АЭ — Аэрологическая станция.

Fig. 1. Map of the aerological sounding network in the Russian Federation as of December 2022.

ARN "Polyus — Aerological radio navigation complex; AVK — aerological computing complex; MARL — small-sized upper-air radar; "VECTOR-M" — Upper-air radar computing complex; ARNA "Polet — Aerological radio navigation complex; "Whirlwind" — Upper-air radar computing complex; Radar — Radar station; AE — Aerological station.

Дешевой и массовой альтернативой радиозондам, поднимаемым на шарах-пилотах, могут стать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с размещенными на них датчиками температуры и влажности, описание которых дается в настоящей статье.

Зондирование атмосферы при помощи БПЛА

Использование малых БПЛА в качестве платформы для метеорологических датчиков относится к началу 1960-х гг., но их внедрение в оперативную практику стало возможным только с появлением на рынке дешевых и эффективных БПЛА [2]. БПЛА являются не просто гибким инструментом атмосферного зондирования, но их использование, как правило, дешевле по сравнению с традиционными методами зондирования.

Существенным аргументом перехода на измерения, проводимые с помощью БПЛА, является их экономическая эффективность. При стоимости радиозонда в Европе в 160 евро, стоимость 720 запусков зондов в год составляет 115 200 евро. Так как стоимость БПЛА составляет примерно 1600 евро и в течение года используется максимум 2 БПЛА, а один радиозонд может использоваться как минимум в течение 25 запусков, то стоимость 720 запусков зондов в год составляет 23 800 евро. С учетом таких дополнительных расходов, как заработная плата сотрудников и содержание имущества, потенциальное снижение стоимости радиозондирования может составлять 60 % и более [5].

Измерения, полученные с БПЛА, не смогут полностью заменить сеть радиозондирования, так как высота подъема БПЛА обычно не превышает 5 км. Исходя из того, что временная изменчивость верхних слоев атмосферы низка по сравнению с изменчивостью в планетарном пограничном слое, то потребность в радиозондовых измерениях в верхней тропосфере и стратосфере не превышает 1 раза в сутки. Так, радиозондовые измерения, проводимые один раз в сутки, можно дополнить учащенными измерениями при помощи БПЛА и уменьшить эксплуатационные затраты. Сеть зондирования нижней и средней тропосферы в удаленных районах проще и дешевле организовать при помощи БПЛА, чем устанавливая традиционные станции радиозондирования.

Применение в качестве носителя радиозонда БПЛА позволяет снизить загрязнение окружающей среды использованными приборами и латексными оболочками, поскольку в этом случае датчики используются многократно, а латексные оболочки не используются совсем. Существенное загрязнение окружающей среды возникает при выработке водорода на станциях, тогда как при использовании БПЛА водород не применяется.

Учащенные измерения структуры пограничного слоя атмосферы, которые возможно реализовать в случае использования БПЛА, позволяют улучшить качество краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов погоды [3]. Численные эксперименты продемонстрировали снижение среднеквадратической ошибки пятнадцатиминутных прогнозов температуры, ветра и влажности более чем на 40 % при увеличении плотности сети радиозондирования, поэтому в Швейцарии

для улучшения прогноза погоды в аэропортах было начато регулярное зондирование атмосферы при помощи БПЛА [4]. В Индии в 2022 г. секретарь Министерства наук о Земле предложил промышленности и академическим кругам принять участие в изучении возможностей беспилотных технологий для наблюдения за погодой с целью улучшения качества прогнозов.

В марте 2024 г. стартовала демонстрационная кампания под эгидой ВМО, которая включает в себя шестимесячный испытательный период метеорологических наблюдений, добровольно проводимых операторами-участниками при помощи БПЛА (<https://community.wmo.int/uas-demonstration/description>). В кампании принимают участие представители государственного и частного секторов, специализирующиеся в области внедрения и эксплуатации БПЛА для целей гидрометеорологических исследований и оперативного прогнозирования. Кампания координируется Комиссией ВМО по наблюдению, инфраструктуре и информационным системам (ИНФКОМ).

По окончании демонстрационной кампании Комиссия вынесет рекомендации, касающиеся нормативных условий, налагаемых на оборудование, размещаемое на БПЛА для гидрометеорологических наблюдений. Основное внимание будет уделяться обеспечению измерения атмосферных переменных, необходимых для усвоения в системах численного прогнозирования погоды.

Оборудование и программное обеспечение, предназначенное для обеспечения зондирования атмосферы при помощи БПЛА

Принимая во внимание мировой опыт, нами была поставлена цель разработки концепции отечественного комплекса вертикального зондирования атмосферы, который был бы оборудован:

- стандартным сертифицированным комплексом измерительных датчиков;
- доступным и дешевым наземным оборудованием приема сигнала с измерительных датчиков;
- свободно распространяемым программным обеспечением для декодирования получаемой информации;
- БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой, позволяющим нести нагрузку не менее 1 кг и поднимающегося на высоту не ниже 2 км.

В качестве образца для проведения эксперимента комплекса был использован БПЛА «БВС IRBIS-432» производства компании «Ирбис» (рис. 2), обладающий следующими характеристиками:

- полётное время с нагрузкой 5 кг — 60 мин;
- максимальная высота полёта — 2500 м;
- крейсерская скорость — 40 км/ч;
- температурный режим эксплуатации — от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ветровая нагрузка при взлете/посадке — до 20 м/с;
- взлет / посадка — вертикальный.

Важным требованием к измерительной системе комплекса является сертификация ее как средства наблюдений. Наиболее подходящим измерительным

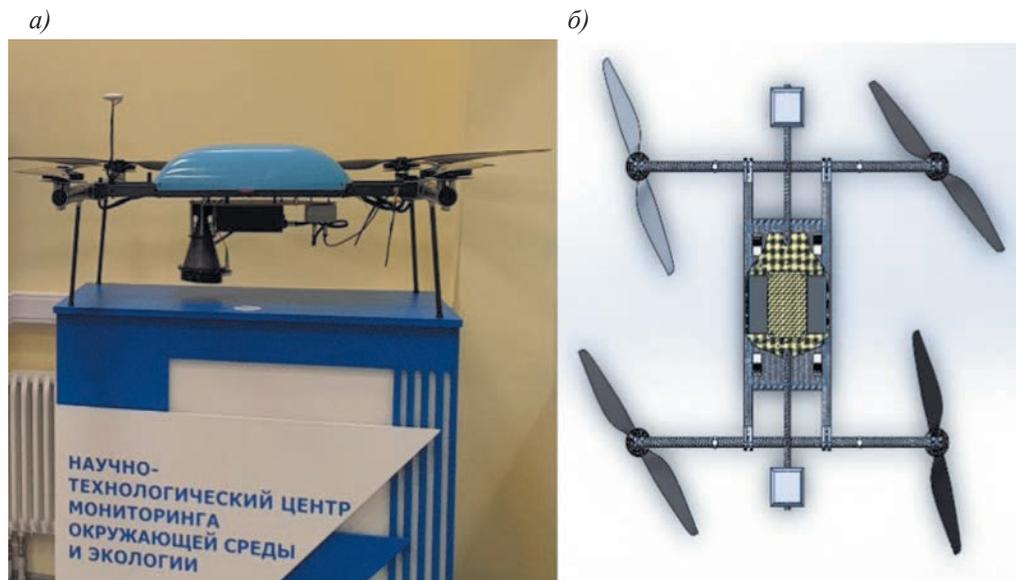


Рис. 2. БПЛА «БВС IRBIS-432»: *a* — вид в профиль; *б* — вид сверху.

Fig. 2. UAV “BVS IRBIS-432”: *a* — profile view; *б* — top view.

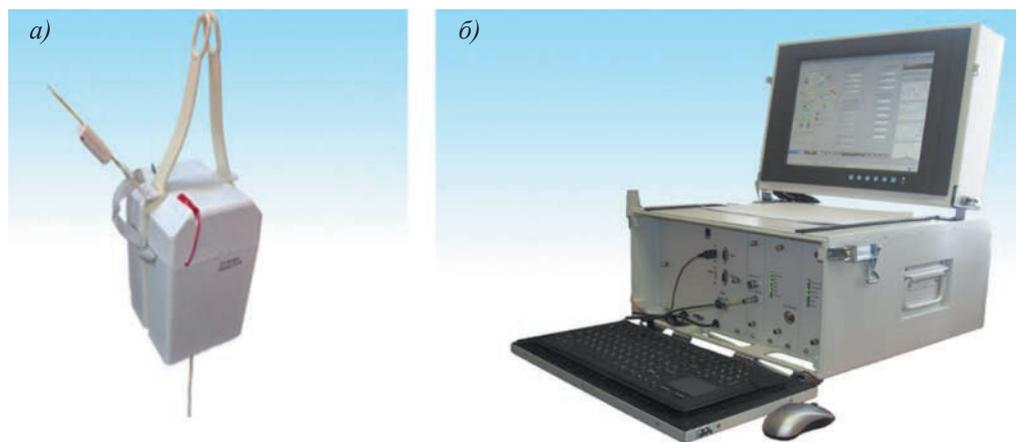


Рис. 3. Внешний вид радиозонда МР3-Н1 (*a*) и базовой станции системы радиозондирования «Полюс» (БС СР «ПОЛЮС») (*б*).

Fig. 3. Appearance of the MP3-N1 radiosonde and the base station of the Polyus radiosonde system (BS SR “POLYUS”).

оборудованием с учетом перечисленных требований является метеорологический радиозонд МР3-Н1 (рис. 3), который используется в комплекте с навигационной системой зондирования атмосферы «Полюс» (табл. 1) [6]. В документе «Программа

и качество наблюдений» за 2022 г., выпущенном Центральной Аэрологической Обсерваторией отмечается, что показатели навигационного радиозонда МРЗ-Н1 имеют наилучшую точность измерений среди оборудования, традиционно применяемого на сети Росгидромета. Измерение высоты у зонда МРЗ-Н1 производится при помощи приемника глобальной системы позиционирования GPS/ГЛОНАСС, что позволяет отказаться от использования наземного радиолокатора.

Радиозонд МРЗ-Н1 редко используется на сети Росгидромета (рис. 1) вследствие его высокой стоимости и необходимости применения приемной базовой станции системы радиозондирования «Полюс», но поскольку БПЛА всегда возвращается обратно в точку взлета, то после замены источника питания у радиозонда МРЗ-Н1 его можно использовать повторно, и стоимость использования снижается многократно.

Таблица 1

Основные характеристики радиозонда МРЗ-Н1
Main characteristics of the MR3-N1 radiosonde

Датчик температуры	Миниатюрный термистор с малым показателем тепловой инерции
Диапазон измерения температуры	от -90 до $+50$ °С
Максимальный предел допустимой абсолютной погрешности при измерении температуры	не более $0,6$ °С
Диапазон измерения относительной влажности:	от 0 до 100 %
– в диапазоне влажности 0 — 10 %	не более 8 %
– в диапазоне влажности 10 — 90 %	не более 5 %
– в диапазоне влажности 90 — 100 %	не более 8 %
Диапазон измерения атмосферного давления	от 2 гПа до 1100 гПа
Максимальная среднеквадратическая погрешность измерения высоты	не более 10 м
Рабочая частота	от $400,2$ до 406 МГц

В отличие от шаров-зондов БПЛА не удаляются от точки взлета на десятки и сотни километров, следовательно, при приеме сигнала с радиозонда МРЗ-Н1 можно отказаться от применения приемной базовой станции «Полюс» и осуществлять прием при помощи бюджетного компактного радиосканера RTL-SDR (рис. 4). Характеристики радиосканера позволяют осуществлять прием аналоговых и цифровых радиостанций в диапазоне приема от 10 до 1400 МГц с поддержанием низкого фоновых шума и высокой чувствительности, а наличие в радиосканере маломощного усилителя для высокочастотных (HF) сигналов позволяет простой штыревой антенной принимать сигналы радиозонда с высоты до 5 км над точкой запуска БПЛА. При этом радиосканер имеет миниатюрный размер и низкую стоимость — примерно 50 долларов США.

Использование БПЛА, укомплектованного радиозондом МРЗ-Н1 и радиосканером, удешевляет стоимость базового оборудования для проведения вертикального зондирования атмосферы в десятки раз при аналогичном качестве получаемых данных.



Рис. 4. Радиосканер RTL-SDR.

Fig. 4. RTL-SDR radio scanner.

Для приема и декодирования сигнала радиозонда МРЗ-Н1 используется стандартное программное обеспечение приемной базовой станции «Полус». Кроме того, обработку сигнала радиозонда можно проводить при помощи свободно распространяемого программного пакета «Sdrsharp» под ОС Windows или ОС Linux. Пример экранного интерфейса «Sdrsharp» приведен на рис. 5. Для декодирования сигнала радиозонда в этом случае используется свободно распространяемое программное обеспечение, полученное из проекта `radiosonde_auto_rx`.

Дешифрирование полученных с радиозонда данных и построение аэрологической диаграммы производится при помощи свободно распространяемого набора утилит проекта `radiosonde_auto_rx`, написанного на языке Python (https://github.com/projecthorus/radiosonde_auto_rx/wiki). Утилиты позволяют по полученным данным зондирования построить аэрологическую диаграмму (рис. 6).

Использование радиосканера в комплекте со свободно распространяемым программным обеспечением позволяет отказаться от использования дорогостоящей базовой станции системы радиозондирования «Полус» и применять для приема, декодирования и дешифровки данных обычный ноутбук или смартфон.

Стандартный способ измерения параметров ветра на высотах предполагает получение тем или иным способом координат радиозонда, по которым вычисляются его скорость и направление переноса. В связи с тем, что радиозонд, размещенный на БПЛА, не перемещается по направлению воздушного потока, а поднимается вертикально вверх над точкой запуска, то стандартный метод измерения параметров ветра использовать невозможно.

Измерение скорости и направления ветра комплексом БПЛА и радиозонда МРЗ-Н1 может быть выполнено несколькими способами. Одним из них является проведение измерений с использованием программного обеспечения БПЛА.



Рис. 5. Интерфейс ПО «Sdrsharp», предназначенного для обработки сигнала радиозонда, получаемого при помощи радиосканера RTL-SDR.

Fig. 5. Interface of the Sdrsharp software, designed for processing the radiosonde signal received using the RTL-SDR radio scanner.

Принцип определения скорости и направления ветра базируется на том предположении, что БПЛА полностью неподвижен и имеет автопилот, способный удерживать БПЛА в одном и том же положении независимо от направления и скорости воздействующего на него ветра. Предполагается, что угол наклона БПЛА полностью коррелирует со скоростью ветра, а погрешности в определении скорости и направлении ветра меньше 0,5 м/с и 30° соответственно (рис. 7). Величина угла наклона БПЛА, получаемая по радиоканалу управления, используется для расчета скорости и направления ветра.

Другим способом измерения параметров ветра является размещение на БПЛА ультразвукового анемометра. Хотя такой способ и позволяет получать результаты измерения с погрешностью в десятые доли градуса, но требует, как использования дорогостоящего оборудования, так и проведения дополнительных исследований по изучению влияния возмущения воздушного потока винтами конкретной модели БПЛА на измерения анемометра [7].

Еще одним способом измерения параметров ветра является возможность БПЛА дрейфовать по направлению ветра, при этом поддерживая скорость, крен, тангаж и рыскание БПЛА на нулевом уровне. Скорость и направление ветра при этом измеряется при помощи датчика глобального позиционирования радиозонда с погрешностью не более 1 м/с по скорости и 2—3° по направлению [8]. Данный

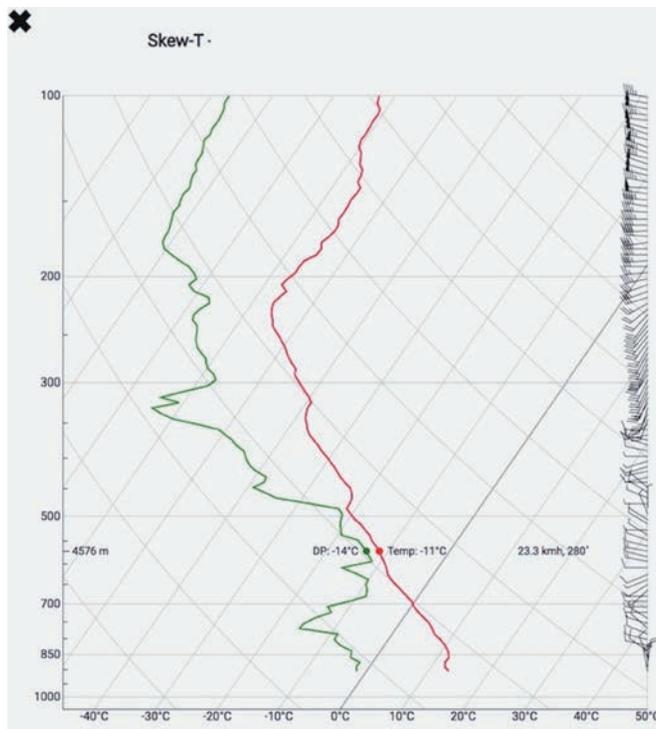


Рис. 6. Пример построения аэрологической диаграммы, построенный при помощи утилиты проекта radiosonde_auto_rx.

Fig. 6. An example of constructing an aerological diagram, built using the radiosonde_auto_rx project utility.

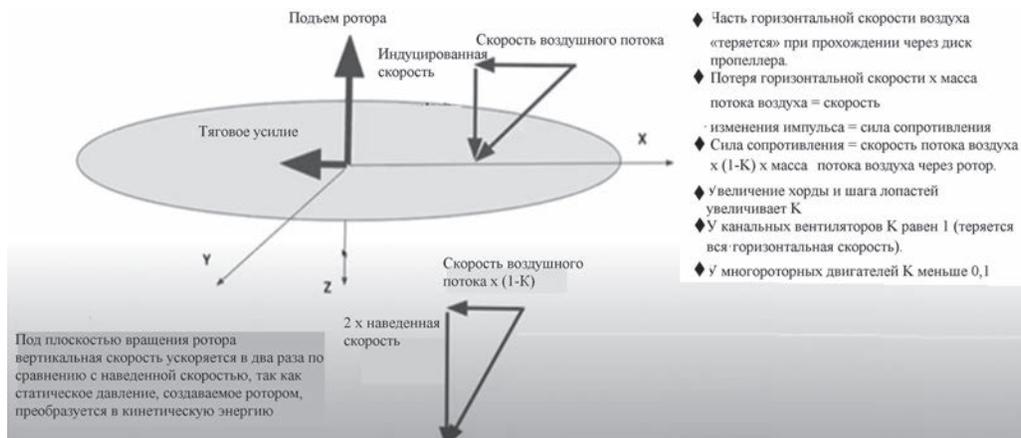


Рис. 7. Принцип определения скорости и направления ветра, действующего на БПЛА.

Fig. 7. The principle of determining the speed and direction of the wind acting on the UAV.

метод измерения параметров ветра редко используется в связи с тем, что необходимо строить сложный вертикальный маршрут полета, при котором происходит зависание БПЛА на заранее определенных горизонтах и переход в режим дрейфа с последующим возвращением в начальную точку для продолжения вертикального режима полета.

Сравнение стандартных радиозондовых измерений и измерений с помощью БПЛА

Данные измерения температуры, влажности и параметров ветра, получаемые с БПЛА, согласуются с измерениями, проводимыми с помощью радиозондов. В работе [9] была показана согласованность вертикальных профилей средней температуры воздуха, скорости и направления ветра, получаемых с помощью БПЛА, с данными автоматической метеостанции и микроволнового температурного профилера МТП-5 (рис. 8). В исследовании [10] сравнивалось измерение

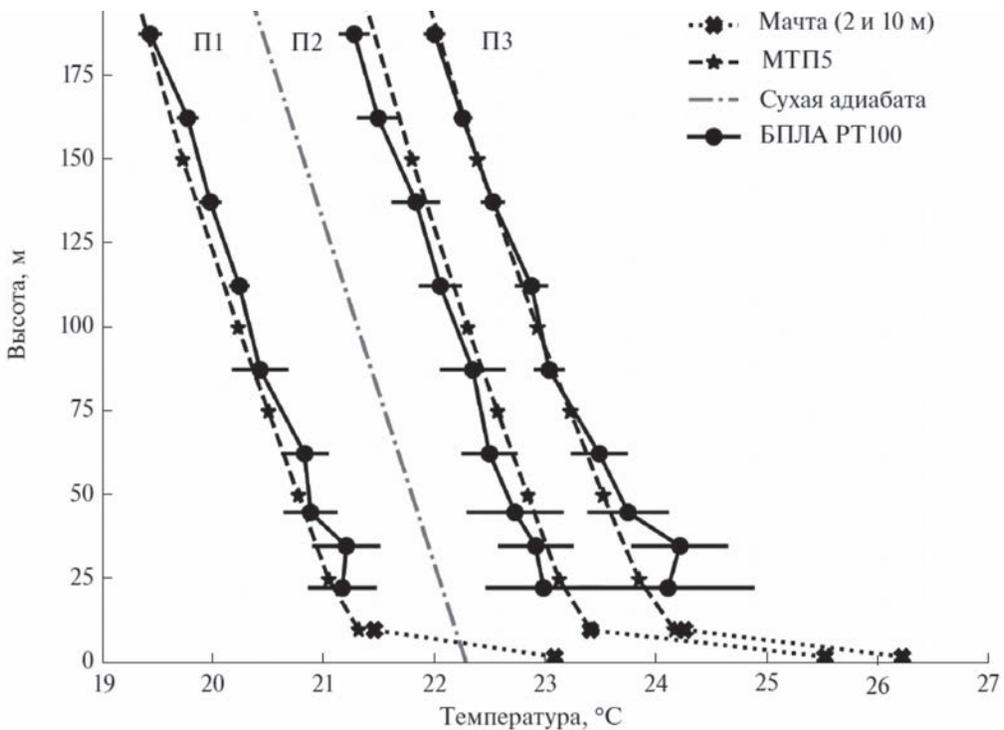


Рис. 8. Вертикальные профили температуры воздуха согласно измерениям с борта БПЛА и данным профилера МТП-5.

Горизонтальные черточки — дисперсия температуры по измерениям БПЛА.

Fig. 8. Vertical profiles of air temperature according to measurements from the UAV and data from the MTP-5 profiler.

Horizontal bars — temperature dispersion according to UAV measurements.

скорости и направления ветра по данным ориентации БПЛА и данным содаров. Среднеквадратическая ошибка измерений скорости ветра составила около 0,5 м/с по скорости и 30° по направлению ветра. При этом в статье было подчеркнуто, что улучшить качество измерений ветра можно как за счет усовершенствования аппаратных и программных вариантов обработки данных, так и размещения дополнительной аппаратуры и усложнения процедур постобработки.

В экспериментах Varfuss et al. [11] сравнивались измерения, проводимые с БПЛА, со штатной системой радиозондирования. Измерения температуры, влажности и ветра с БПЛА в целом согласуются с временными и пространственными измерениями штатной системы радиозондирования до высоты 500 гПа, то есть до высот, для которых предлагается использовать комплекс радиозондирования. Инверсии температуры, изменения градиента температуры и параметры ветра в равной степени фиксируются датчиками, размещенными на БПЛА и штатными радиозондовыми измерениями.

Выводы по возможности использования БПЛА как средства измерения параметров вертикальной структуры атмосферы

В настоящее время наиболее широко используемым измерительным прибором для метеорологического профилирования атмосферы является радиозонд, поднимаемый оболочкой, наполненной водородом или гелием. Однако в последние годы появился новый способ зондирования нижних слоев атмосферы при помощи измерительных датчиков, размещенных на БПЛА. Этот способ является перспективной и недорогой альтернативой традиционным платформам вертикального зондирования атмосферы.

В данной работе автором предложена оптимальная комплектация системы радиозондирования атмосферы при помощи БПЛА, которая предполагает многократное использование стандартного радиозонда МРЗ-Н1. Для замены дорогостоящей наземной станции приема и обработки сигнала предложен радиосканер RTL-SDR, подключаемый к ноутбуку или смартфону, а в качестве инструмента дешифрирования и построения аэрологической диаграммы предлагается использовать свободно распространяемое программное обеспечение.

В связи с тем, что БПЛА производит вертикальное зондирование над точкой взлета и посадки, то вычисление параметров ветра становится невозможным методом определения координат аппарата. Для расчета параметров ветра предлагается использовать программное обеспечение, которое позволяет восстанавливать скорость и направление ветра, определяя угол наклона БПЛА к набегающему воздушному потоку. Альтернативным способом расчета ветровых параметров является использование данных датчика GPS/ГЛОНАСС. Для этого БПЛА на фиксированных высотах переводится в режим дрейфа по ветру. Второй способ расчета параметров ветра является более точным, но его применение значительно усложняет траекторию полета БПЛА и увеличивает время проведения зондирования.

Очевидными преимуществами предложенной схемы зондирования при помощи БПЛА являются:

— использование серийного сертифицированного оборудования, позволяющего получать результаты измерений с той же точностью, что и на регулярной сети измерений;

— низкая стоимость эксплуатации комплекса, которая примерно в восемь раз меньше эксплуатационной стоимости традиционной станции аэрологического зондирования;

— высокая мобильность вследствие компактности используемого оборудования позволяет проводить измерения в труднодоступных районах;

— возможность проведения учащенных наблюдений пограничного слоя атмосферы позволяет увеличить качество краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов.

Для внедрения БПЛА в оперативную практику Росгидромета необходимо проведение дополнительных исследований по выбору схемы расчета ветровых параметров, проведение сертификации всего измерительного комплекса как средства измерения и модификация структуры наблюдательной сети вертикального зондирования атмосферы.

Список литературы

1. Guide to meteorological instrument and observing practices // WMO. 1984. Vol. 6. P. 600. DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-432>.
2. Konrad T., Hill M., Rowland J. et al. A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors // Johns Hopkins APL Tech. Dig. 1970. Vol. 10. P. 11—21.
3. de Boer, Diehl G., Jacob C. et al. Development of Community, Capabilities, and Understanding through Unmanned Aircraft-Based // Atmospheric Research, Bulletin of the American Meteorological Society. 2020. Vol. 101. P. 684—699. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0050.1.
4. Leuenberger D., Haefele A., Omanovic N. et al. Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations // Bulletin of the American Meteorological Society. 2020. Vol. 101, P. 1036—1051. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0119.1>.
5. Pätzold F. Windmessung mittels Segelflugzeug, Forschungsbericht. // Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt, Braunschweig, Germany. 2018. Vol. 2018. 04. P.44. DOI: 10.24355/dbbs.084-201805221102-1.
6. Catalog – 2023: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.meteo-radiy.ru/katalog/radiozondyi/radiozond_mp3_h1 (дата обращения: 01.11.2023)
7. Shimura T., Inoue M., Tsujimoto H. et al. Estimation of wind vector profile using a hexarotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above surface. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2018. Vol. 35. Issue 8. P. 1621—1631. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0186.1/>
8. Kugelberg E., Andersson O., Wind Vector Estimation by Drone // School of Industrial Engineering and Management, ITM, Sweden. 2020. P. 94. DiVA, id: diva2:1464433.
9. Чечина Д. Г., Артамонова А. Ю., Бодунков Н. Е. и др. Опыт исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с помощью беспилотного летательного аппарата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. № 57. С. 602—610. DOI: 10.31857/S0002351521050047.
10. Ross T., Palomaki V., Nathan T. et al. Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017. Vol. 34. Issue 5. P. 1183—1191. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0177.1.
11. Barfuss K., Schmithusen H., Lampert A. Drone-based meteorological observations up to the tropopause // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3739—3765. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-16-3739-2023>.

References

1. Guide to meteorological instrument and observing practices. WMO. 1984; 6: 600.
2. Konrad T., Hill M., Rowland J., et al. A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors. Johns Hopkins APL Tech. Dig. 1970; 10: 11—21.
3. de Boer, Diehl G., Jacob C., Houston J. et al. Development of Community, Capabilities, and Understanding through Unmanned Aircraft-Based. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020; 101: 684—699.
4. Leuenberger D., Haeefele A., Omanovic N. et al. Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020; 101: 1036—1051.
5. Pätzold F. Windmessung mittels Segelflugzeug, Forschungsbericht. Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt, Braunschweig, Germany. 2018; 04.
6. Catalog — 2023. Available at: http://www.meteo-radiy.ru/katalog/radiozondyi/radiozond_mp3_h1 (accessed on: 01.11.2023)
7. Shimura T., Inoue M., Tsujimoto H. et al. Estimation of wind vector profile using a hexarotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018; 35(8): 1621—1631.
8. Kugelberg E., Andersson O., Wind Vector Estimation by Drone. School of Industrial Engineering and Management, ITM, Sweden. 2020
9. Chechina D. G., Artamonova A. Yu., Bodunkov N. E. et al. Experience in studying the turbulent structure of the atmospheric boundary layer using an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestia RAN. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021; 57: (602—610). (In Russ).
10. Ross T., Palomaki V., Nathan T. et al. Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017; 34: 1183—1191.
11. Barfuss K., Schmithusen H., Lampert A. Drone-based meteorological observations up to the tropopause. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023; 16: 3739—3765.

Сведения об авторе

Цепелев Валерий Юрьевич, кандидат географических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, доцент кафедры метеорологических прогнозов, v0010200@mail.ru.

Information about author

Tsepelev Valery Yurievich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Meteorological Forecasts of the Russian State University of Humanities, v0010200@mail.ru.

Статья поступила 19.11.2023

Принята в печать после доработки 14.05.2024

The article was received on 19.11.2023

The article was accepted after revision on 14.05.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):451—473.

КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.524(98)
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473

Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов

***Леонид Александрович Тимохов¹, Валерий Николаевич Малинин²,
Владимир Васильевич Иванов¹***

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, malinin@rshu.ru

Аннотация. Статистическим методом установлена связь долговременных (межгодовых и внутривековых) колебаний температуры воздуха в Арктике с основными гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами. Определена их роль в изменениях температуры воздуха и построены статистические модели долговременных колебаний температуры воздуха. Прогностические оценки с использованием астрогеофизических предикторов показывают, что температура воздуха в арктической зоне 70—85° с.ш. к 2040 г. будет понижаться, сохраняя внутри декадные вариации. Характер изменения температуры воздуха в морской части морей российской Арктики в 2021—2043 гг. подобен колебаниям температуры воздуха в широтной зоне.

Ключевые слова: долговременные колебания температуры воздуха в Арктике, статистические модели, гидрометеорологические и астрогеофизические факторы, опытный прогноз.

Для цитирования: Тимохов Л. А., Малинин В. Н., Иванов В. В. Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473.

Original article

The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrogeophysical factors

Leonid A. Timokhov¹, Valery N. Malinin², Vladimir V. Ivanov¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Itim@aari.ru

² Russian State Hydrometeorological University, malinin@rshu.ru

Summary. A statistical method has been used to establish the relationship of long-term (interannual and intra — century) fluctuations in the average three-year sliding air temperature in the Arctic with the main hydrometeorological and astrogeophysical factors, and their role in changes in air temperature is determined. The statistical models of air temperature in the Arctic include variables such as the Arctic seas ice, the AMO index (an indicator of the thermal state of the North Atlantic) and the sum of the western and eastern forms of atmospheric circulation according to the Wengenheim classification. Hydrometeorological characteristics determine 80 % of the total air temperature dispersion in the latitude zone of 70–85° and 74 % of the total air temperature dispersion in the Arctic seas.

Statistical models of long-term fluctuations in air temperature, taking into account astrogeophysical factors, include the following predictors: the index of insolation contrast, the duration of the day, the moment of inertia of rotation of large planets relative to the center of mass of the Solar system and the difference in energy coming from the Sun in the 0th and 10th years. Astrogeophysical characteristics determine 77 % of the total air temperature dispersion in the latitude zone of 70–85° and 77 % of the total air temperature dispersion in the Arctic seas. According to preliminary estimates, the air temperature in the Arctic zone 70–85° to 2040 is likely to decrease slightly, maintaining interannual variations with a period of 10–12 years. The nature of changes in air temperature in the marine part of the Russian Arctic seas in 2021–2043 is assumed to be similar to fluctuations in air temperature in the latitudinal zone.

Keywords: long-term fluctuations of air temperature in the Arctic, regression analysis, statistical models, hydrometeorological predictors, astrogeophysical factors, experimental long-term forecast.

For citation: Timokhov L. A., Malinin V. N., Ivanov V. V. The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrogeophysical factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):451—473. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473.

Введение

Значительное потепление климата Арктики в конце XX и начале XXI столетий характеризуется повышением средней температуры воздуха в зимний и летний периоды [1], перестройкой крупномасштабных атмосферных процессов [2], уменьшением площади льдов в сентябре на акватории Северного Ледовитого океана и в российских арктических морях [3, 4], изменением характеристик гидрологического режима арктических морей и в целом Северного ледовитого океана [5, 6]. Однако причины этих изменений, возможности их описания, а тем более построения долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза, изучены недостаточно и не отвечают практическим потребностям [7]. Информация об изменениях климатических условий и такой важной характеристике как температура воздуха имеет

важное значение при принятии решений в управлении хозяйственной и морской деятельностью в Арктике, поэтому поиск причин и разработка методов описания долговременных изменений природных условий Арктики, включая температуру воздуха, являются важной научной и практической задачей гидрометеорологии.

Изменения климата Арктики, включая температуру воздуха, за последние столетия описаны во многих публикациях, но наиболее полный анализ дан в коллективной монографии «Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв.» под редакцией Б. А. Крутских [8]. В статье Г. В. Алексеева и др. [9] установлен ряд закономерностей изменчивости климата Арктики:

— выявлена решающая роль в поддержании теплового баланса Северной полярной области (СПО) переноса тепла по направлению к полюсу в результате циркуляции атмосферы и океана;

— выявлена сильная обратная связь между средней температурой воздуха в СПО и умеренных широтах и значительная неоднородность пространственного распределения температуры;

— показано, что аномалии среднеширотных и средних для всей СПО значений температуры связаны отрицательной корреляцией с аномалиями в умеренной зоне $45\text{—}55^\circ$ с.ш., причем смена знака среднеширотных аномалий наиболее часто происходит в полосе $60\text{—}70^\circ$ с.ш. [9].

А. И. Воскресенский и др. [10] в экспертных оценках возможных изменений климата атмосферы в Арктике исследовали ряд факторов, которые могут потенциально влиять на климат в Арктике. Показана связь изменения диссиметрии Солнечной системы и температуры воздуха в северном полушарии (средние пятилетние скользящие значения). Н. Д. Виноградов и др. [11] рассмотрели изменения в структуре общей циркуляции атмосферы (ОЦА) в Арктике и оценили влияние солнечной активности и приливообразующих сил планет Солнечной системы на циркуляцию атмосферы.

Особенности и причины межгодовых и вековых изменений температуры воздуха северного и южного полушарий и Земли в целом обсуждались во многих публикациях. Считается, что главной причиной современных изменений климата является парниковый эффект [12]. Его влияние на климат состоит, прежде всего, в формировании трендов. Характеристикой парникового эффекта (ПЭ) могут служить радиационные индексы G_a [13] и G_s [14]. Первый представляет длинноволновый баланс атмосферы, который характеризует ПЭ всей атмосферы, а второй — противоизлучение атмосферы, характеризующее ПЭ непосредственно у подстилающей поверхности. Оба индекса имеют максимальные значения в области внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), а минимальные — в полярных широтах. Соответственно, наибольший ПЭ свойствен экваториальным широтам, в то время как в Арктике его влияние минимально.

В соответствии с работами [15, 16] основным фактором, одновременно определяющим межгодовую изменчивость индекса G_a , тренд и межгодовую изменчивость G_s , является влагосодержание атмосферы (ВА). При этом ВА имеет максимальный тренд в области ВЗК, минимальный — в северных широтах, а температура воздуха, наоборот, максимальный тренд — в Арктике и незначимый

тренд — в экваториальной зоне [17]. В области ВЗК рост ВА в результате влагообмена в системе океан-атмосфера приводит к повышению индекса G_s , который повышает температуру воздуха. Она, в свою очередь, за счет абсолютной влажности увеличивает концентрацию водяного пара в атмосфере. Эта положительная обратная связь вследствие максимальных значений ВА и Т в ВЗК ярко выражена.

В Арктике ПЭ и положительная обратная связь выражены очень слабо, поэтому основное влияние на тренд и межгодовую изменчивость Т должны оказывать другие внутренние факторы. Это океанический перенос тепла из Северной Атлантики [18] и атмосферный меридиональный перенос тепла и влаги [19].

В модели тропического потепления Арктики указывается на ведущую роль конвекции в тропической зоне [20, 21]. Конвекция возбуждает распространяющиеся к полюсам волновые цепочки Россби, переносящие водяной пар и тепло в атмосферу Арктики. При этом важным компонентом этого механизма является увеличение нисходящего инфракрасного излучения (ИК) в Арктике, которое предшествует арктическому потеплению [20]. Таким образом, основные физические механизмы, которые могут вызывать потепление в Арктике, включают как локальные обратные связи, так и изменения в переносе энергии к полюсу [20].

Описанные процессы и механизмы относятся к внутренним факторам формирования и изменения климата [23]. Но на изменчивость климата, включая температуру воздуха, могут также влиять внешние факторы: приходящая суммарная солнечная энергия [24], геомагнитное поле и скорость вращения Земли [25, 26, 27], суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы [28, 29], лунно-солнечные приливные силы [30, 31, 32].

Цель настоящей работы состоит в исследовании статистическими методами связи долговременных (межгодовых и внутривековых) колебаний температуры воздуха в Арктике с основными гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами, оценке их роли и построении статистических моделей долговременных колебаний температуры воздуха.

Данные и методы исследования

В работе используются два временных ряда аномалий среднегодовой приповерхностной температуры воздуха. Первый из них (T_z) составлен в отделе долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ для широтной зоны 70—85° с.ш. по данным более чем за 120-летний период [2]. Второй ряд среднегодовой температуры воздуха (T_s) на акватории арктических морей составлен в отделе взаимодействия океана и атмосферы ААНИИ за период с 1901 г. по 2022 г. [1].

Для исследования связи долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике с гидрометеорологическими предикторами были использованы средние годовые значения следующих переменных:

1. Индексы атмосферной циркуляции: Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO); Североатлантическое колебание (North Atlantic Oscillation, NAO); тихоокеанский/североамериканский индекс (Pacific/North American Pattern, PNA), которые заимствованы с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

2. Индексы теплового состояния океана: Атлантическая мультидекадная осцилляция (Atlantic multidecadal oscillation, АМО), отражающая долгопериодную изменчивость ТПО Северной Атлантики; Тихоокеанское декадное колебание (Pacific Decadal Oscillation, PDO), характеризующее долгопериодную изменчивость ТПО в северной части Тихого океана <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

3. Аномалии относительно периода 1900—2023 гг. числа форм циркуляции в году по классификации Вангенгейма (западной формы W, меридиональной S, восточной E и суммы W+E) [2].

4. Суммарная ледовитость (Ice) западных и восточных морей российской Арктики [33].

Дополнительно в качестве астрогеофизических факторов в работе использованы ряды следующих астрономических показателей:

1. Годовой приход солнечной радиации Q на верхнюю границу атмосферы Земли в полярной зоне, связанный с небесно-механическими процессами. Эти переменные рассчитаны по данным Костина и Федорова <http://www.solar-climate.com/en/ensc/basard.htm/>, где авторы учитывали изменения расстояния между Землей и Солнцем, изменения наклона оси вращения Земли в результате прецессии и нутации и др. [24].

2. Градиент инсоляции dQ (инсоляционная контрастность [34]), в качестве которой нами использована разность инсоляции в широтных зонах $45\text{--}65^\circ$ и $65\text{--}85^\circ$ с.ш., обозначенная индексом $dQ = Q_{45-65} - Q_{65-85}$. В работе [24] показана статистическая связь глобальной приповерхностной температуры воздуха с величиной инсоляционной контрастности. По мнению Davis and Brewer [31], контрастность температуры между севером и югом управляет атмосферной циркуляцией Земли и ветровой циркуляцией океана.

3. Изменения среднегодовых значений солнечной радиации, связанные с изменением активности Солнца (индекс Ws , среднегодовые значения чисел Вольфа https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt).

4. Разность $dWs = Ws(0) - Ws(-10)$, которая означает поступление от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы. Этот индекс в первом приближении воспроизводит структуру квазидвадцатилетнего цикла вариации инсоляции [24].

5. Для характеристики скорости вращения Земли взяты средние годовые вариации продолжительности суток, индекс lod (length of day), заимствованный с сайта <ftp://ftp.nga.mil/pub2/gps/eopp/yuuueopp/EOPPyddd.TXT>. Уменьшение продолжительности суток lod соответствует увеличению скорости вращения Земли и наоборот.

6. Среднегодовой суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы Js , временной ряд которого был предоставлен Б. Г. Шерстюковым [29].

Предварительно для всех вышеперечисленных переменных Tz , Ts , гидрометеорологических и астрогеофизических параметров с целью уменьшения случайных ошибок рассчитывались средние трехлетние скользящие аномалии, полученные путем сглаживания средних годовых значений трехлетним фильтром, которые затем были нормированы на среднеквадратическое отклонение. Именно

такие значения параметров использовались в последующих расчетах. С учетом того, что предикторы задавались с временными лагами (сдвигами) от 0 до (-16) лет, общее число временных рядов составило более 90.

Связь температуры воздуха с гидрометеорологическими характеристиками

В работах [2, 11, 35] было показано, что приземная температура воздуха в Арктике связана с режимом атмосферной циркуляции, температурой океана в Северной Атлантике и ледовитостью восточных и западных арктических морей. Теснота связи нормированных аномалий температуры воздуха T_z и T_s между собой и с отдельными гидрометеорологическими переменными приведена в табл. 1. Из оценок в табл. 1 следует, что наиболее тесная корреляция аномалий температуры воздуха наблюдается с индексом АМО и площадью льдов в морях российской Арктики Ice , а синхронная корреляционная связь аномалий температуры воздуха с индексами атмосферной циркуляции и PDO слабая.

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции аномалий температуры воздуха T_z и T_s с выборочными аномалиями трехлетних скользящих значений гидрометеорологических переменных
Paired correlation coefficients of air temperature anomalies T_z and T_s with sample anomalies of three-year sliding values of hydrometeorological variables

	T_z	T_s	Ice	АМО	С	(W + E)	АО	PNA	NAO	PDO
T_z	1,00	0,85	-0,87	0,62	-0,04	0,05	0,19	0,14	-0,14	-0,12
T_s	0,85	1,00	-0,73	0,78	0,06	-0,07	0,05	0,13	-0,25	-0,08

Слабая связь температуры воздуха с PDO и PNA может быть объяснена тем, что эти индексы сильнее влияют на температуру воздуха восточного (канадского) сектора Арктики [35]. Температура воздуха T_z является средней температурой во всей широтной зоне 70—85° с.ш., а значение T_s включает температуру воздуха как восточной, так и западной частей Арктики. В тоже время отмечается [32], что Северная Атлантика оказывает доминирующее влияние на метеорологические процессы в Арктике. Этот тезис находит подтверждение в больших коэффициентах корреляции температуры воздуха с индексом АМО.

Однако следует отметить, что парные коэффициенты корреляции служат только первым указанием на возможную связь того или иного индекса с изменчивостью температуры воздуха. Температура воздуха подвержена влиянию множества факторов, и реальная роль каждого индекса (предиктора) может быть установлена в результате выделения доли его вклада из суммарного влияния нескольких факторов, поэтому нами была поставлена задача получения уравнения связи средней трехлетней скользящей температуры воздуха с множеством гидрометеорологических факторов.

Разработка статистических уравнений связи температуры воздуха для широтной зоны 70—85° с.ш. и акватории арктических морей с гидрометеорологическими характеристиками выполнялась по программам «Статистика» (<http://statistica>).

ru/theory). С помощью пошаговой процедуры множественной линейной регрессии методом последовательного включения переменных [36] с использованием результатов табл. 1 были построены оптимальные модели долговременных колебаний Tz и Ts за 1902—2020 гг. Чтобы отметить зависимость температуры воздуха от гидрометеорологических предикторов, в обозначения температуры воздуха Tz и Ts введены символы hy в скобках: $Tz(hy)$ и $Ts(hy)$. В табл. 2 для примера приведена пошаговая процедура получения статистического уравнения для $Tz(hy)$. Как видно из таблицы, с каждым шагом увеличивается коэффициент детерминации и уменьшается стандартная ошибка модели, но на четвертом шаге уровень значимости p -level оказался больше критического p -level = 0,05. Из этого следует, что оптимальная модель для $Tz(hy)$ содержит три переменные Ice , АМО и S .

Таблица 2

Статистические оценки параметров пошаговых моделей температуры воздуха Tz на каждом шаге включения в регрессионный анализ гидрометеорологических характеристик за 1902—2020 гг.
Statistical estimates of the parameters of step-by-step models of air temperature at each step of inclusion in the multi-regression analysis of additional hydrometeorological characteristics for 1902—2020

Шаг модели j , араметр включения	$R_{(j)}^2$	Стандартная ошибка модели, °С	Критерий Фишера, $F^{(j)}$	p -level $^{(j)}$ max
1-й, $Ice(0)$	0,758	0,49	370,9	0,00
2-й, АМО(0)	0,779	0,47	206,0	0,00
3-й, $S(0)$	0,800	0,45	231,6	0,00
4-й, $E(0)$	0,804	0,45	118,1	0,11

Аналогичная процедура для $Ts(hy)$ позволила выявить оптимальную зависимость от трех переменных Ice , АМО, ($W + E$). В результате в стандартизированном виде уравнения регрессии имеют вид:

$$Tz(hy) = -0,745Ice + 0,232АМО - 0,152С; \quad (1)$$

$$Ts(hy) = -0,407Ice + 0,575АМО + 0,152(W + E). \quad (2)$$

В уравнения (1) и (2) вошли одни и те же характеристики Ice и АМО. Эти предикторы правильно описывают физический характер их связи с температурой воздуха: при уменьшении ледовитости и повышении притока теплых вод из Атлантики (АМО) температура увеличивается. Влияние форм циркуляции на температуру носит разнонаправленный характер, но примерно одинаково.

В процедуре регрессионного анализа важно проверить коллинеарность предикторов. Для этого были рассчитаны взаимные коэффициенты корреляции предикторов, приведенные в табл. 3. Как видно из табл. 3, коэффициенты корреляции между переменными в правых частях уравнений (1) и (2) изменяются от 0,04 до 0,22, за исключением коэффициента корреляции между Ice и АМО ($R = 0,58$). Оценки свидетельствуют о практической независимости предикторов, так как значения коэффициентов корреляции меньше коэффициента корреляции 0,8, считающегося границей при определении коллинеарности [36].

Таблица 3

Коэффициенты взаимной корреляции нормализованных средних трехлетних скользящих значений предиктантов и предикторов за период 1902—2020 гг.

The coefficients of mutual correlation of normalized three-year moving averages of predicates and predictors for the period 1902—2020

Характеристики	<i>Tz</i>	<i>Ts</i>	<i>Ice</i>	АМО	<i>C</i>	(<i>W + E</i>)
<i>Tz</i>	1,00	0,85	-0,87	0,62	-0,04	0,05
<i>Ts</i>	0,85	1,00	-0,73	0,78	0,06	-0,00
<i>Ice</i>	-0,87	-0,73	1,00	-0,58	-0,06	0,07
АМО	0,62	0,78	-0,58	1,00	0,28	-0,22
<i>C</i>	-0,04	0,06	-0,06	0,28	1,00	-0,95
(<i>W + E</i>)	0,05	-0,00	0,07	-0,22	-0,95	1,00

Статистические характеристики уравнений (1) и (2) приведены в табл. 4. Коэффициенты детерминации уравнений (1) и (2) равны $R^2 = 0,80$ и $R^2 = 0,74$, соответственно, т.е. больше требуемого значения $> 0,6$. Уровень значимости *p-level* для предикторов обоих уравнений меньше 0,01 и указывает на то, что надежность расчета коэффициентов регрессии считается достаточной [36]. Критерий Фишера *F* намного больше критического значения $F_{кр}$, то есть полученные уравнения являются адекватными, результаты расчета удовлетворительно соответствуют исходным данным температуры воздуха.

Квадрат коэффициента корреляции, который отражает суммарный вклад предикторов в общую дисперсию многолетних колебаний температуры, свидетельствует, что гидрометеорологические характеристики определяют 80 % дисперсии *Tz(hy)* в широтной зоне 70—85° с.ш. и 74 % дисперсии *Ts(hy)* на акватории арктических морей. Стандартная ошибка расчетов составляет $\Delta Tz(hy) = 0,54$ °C и $\Delta Ts(hy) = 0,44$ °C при стандартном отклонении температуры $\sigma_T = 1,00$ °C для уравнений (1) и (2) соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Статистические характеристики уравнений (1) и (2)
Statistical characteristics of equations (1) and (2)

<i>Tz(hy): R = 0,89; R^2 = 0,80; F = 154,5; F_{кр} = 3,0; ΔTz(hy) = 0,54 °C; σ_T = 1,00 °C</i>			<i>Ts(hy): R = 0,86; R^2 = 0,74; F = 113,5; F_{кр} = 3,0; ΔTs(hy) = 0,44 °C; σ_T = 1,00 °C</i>		
Параметры уравнения (1)	<i>p-level</i>	Вклад, %	Параметры уравнения (2)	<i>p-level</i>	Вклад, %
<i>Ice</i>	0,00	68	<i>Ice</i>	0,00	21
АМО	0,00	8	АМО	0,00	50
<i>C</i>	0,00	4	<i>W+E</i>	0,00	3

Приведенные оценки критериев позволяют сделать вывод, что описание долговременной изменчивости температуры воздуха в Арктике уравнениями (1) и (2) является статистически значимым и достоверно характеризует долговременные колебания температуры воздуха с точностью 74—80 %.

Произведение коэффициента корреляции между предиктантом (температура воздуха) и фактором X_j на стандартизированный коэффициент регрессии в моделях (1), (2) показывает относительный вклад каждого фактора в описание изменчивости температуры воздуха. Эти вклады рассчитаны для каждой переменной в уравнениях (1) и (2) и приведены в табл. 4. Нетрудно увидеть, что дисперсия $Tz(hy)$ на 68 % определяется колебаниями ледовитости арктических морей и на 8 % влиянием тепла Северной Атлантики (индекс АМО). Однако механизм синхронной связи долговременных изменений ледовитости и температуры воздуха нуждается еще в изучении. Вклад формы циркуляции атмосферы C оказался малым.

Слабая связь температуры воздуха в широтной зоне Арктики с АМО может быть объяснена тем, что Северная Атлантика преимущественно влияет на приатлантическую часть полярной зоны 70—85° с.ш. На температуру воздуха в тихоокеанской части зоны 70—85° с.ш. влияет Северная часть Тихого океана [35], но, вероятно, в меньшей степени.

Что касается уравнения (2), то дисперсия температуры воздуха на акватории арктических морей $Ts(hy)$ определяется, главным образом, индексом АМО (50 %) и только на 21 % ледовитостью арктических морей. Данный результат представляется интересным, но требует дополнительного анализа механизма влияния индекса АМО на температуру воздуха на акватории арктических морей. Вклад форм циркуляции атмосферы ($W + E$) оказался малым.

Сопоставление рассчитанных и фактических значений температуры воздуха в Арктике приводится на рис. 1. Из рис. 1 видно, что изменчивость средней трехлетней скользящей температуры воздуха в Арктике хорошо воспроизводится

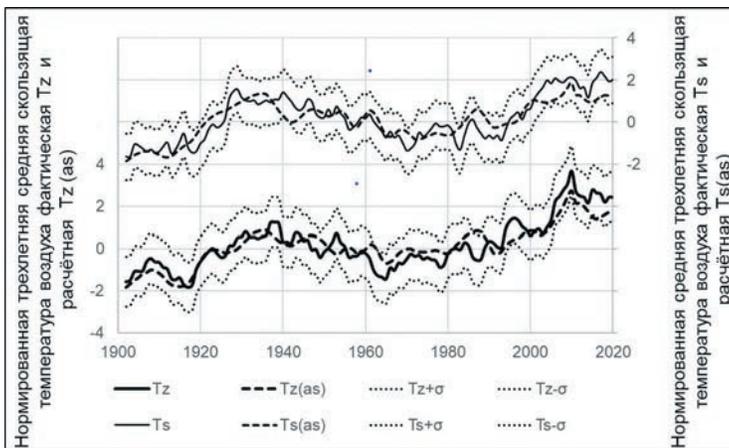


Рис. 1. Сравнение трехлетних скользящих средних значений аномалий температуры воздуха: фактических (Tz , Ts) и вычисленных $Tz(hy)$, $Ts(hy)$ по уравнениям (1) и (2).

Fig. 1. Comparison of actual (Tz , Ts) and calculated by equations (1) and (2) three-year moving averages of air temperature anomalies $Tz(hy)$, $Ts(hy)$.

моделями (1) и (2), в которых в качестве предикторов используются гидрометеорологические параметры.

Полученные статистические модели могут быть использованы не только для диагностических расчетов температуры воздуха, но и для ее прогноза. Но в этом случае возникает необходимость прогноза предикторов, что представляет собой отдельную достаточно сложную проблему.

Связь температуры воздуха с астрогеофизическими параметрами

Для оценки тесноты связи температуры воздуха с астрогеофизическими индексами методом кросскорреляционного анализа были рассчитаны наибольшие коэффициенты корреляции и величины временного лага, приведенные в табл. 5. Величина временного сдвига в годах со знаком минус указывает на опережение предиктором температуры воздуха.

Таблица 5

Парные значимые коэффициенты корреляции аномалий температуры воздуха Tz и Ts с выборочными аномалиями средних трехлетних скользящих значений астрогеофизических индексов. В скобках приведена величина временного сдвига в годах, характеризующего опережение значений предикторов за период 1902—2020 гг.

Paired significant coefficients of correlation of air temperature anomalies Tz and Ts with sample anomalies of the average three-year moving values of astrogeophysical indices. The value of the time lag in years is shown in parentheses for the period 1902—2020

Характеристики	$Js(-19)$	$Js(-27)$	$lod(0)$	$dWs(-7)$	$dWs(-9)$	$dQ(0)$
Tz	---	0,41	-0,55	-0,34	-0,27	0,66
Ts	0,23	---	-0,78	---	-0,24	0,51

Коэффициенты корреляции температуры воздуха с индексами $dQ(0)$ и $lod(0)$ являются значимыми на уровне $\alpha = 0,05$ и превышают величину $R = 0,50$, что свидетельствует о достаточно тесной статистической связи температуры воздуха с указанными индексами. Это означает возможность установления зависимостей Tz и Ts от астрогеофизических факторов. Далее в обозначения Tz и Ts добавлены в скобках символы «as».

С использованием аппарата пошаговой процедуры множественной линейной регрессии были построены стандартизированные оптимальные модели долговременных колебаний нормированных средних трехлетних скользящих значений аномалий температуры воздуха $Tz(as)$, $Ts(as)$ за период 1902—2020 гг.:

$$Tz(as) = 0,420dQ(0) - 0,552lod(0) + 0,395Js(-27) - 0,152dWs(-6); \quad (3)$$

$$Ts(as) = 0,240dQ(0) - 0,771lod(0) + 0,203Js(-27) - 0,134dWs(-9). \quad (4)$$

В уравнения (3) и (4) вошли одни и те же предикторы, но с различными коэффициентами пропорциональности при предикторах, что связано, прежде всего, с географией осреднения температур воздуха, а также с особенностями реакции температуры воздуха на воздействие внешних факторов $dQ(0)$; $lod(0)$; $Js(-27)$, $dWs(-6)$ и $dWs(-9)$.

Для проверки коллинеарности предикторов рассчитаны значения взаимных коэффициентов корреляции предикторов и временные сдвиги (табл. 6). Как видно из таблицы, коэффициенты корреляции между переменными в правых частях уравнений (3) и (4) изменяются от 0,03 до 0,28, что свидетельствует о практической независимости предикторов.

Таблица 6

Коэффициенты взаимной корреляции средних трехлетних стандартизированных скользящих значений предиктантов и предикторов. В скобках указана величина временного сдвига в годах, знак минус указывает опережение предиктором температуры воздуха

Coefficients of mutual correlation of normalized three-year moving averages of predicates and predictors. The value of the time shift in years is indicated in parentheses, and the minus sign indicates that the predictor of air temperature is ahead of schedule

Характеристики уравнения (3)	$Tz(as)$	$Js(-27)$	$lod(0)$	$dWs(-6)$	$dQ(0)$
$Tz(as)$	1,00	0,41	-0,55	-0,32	0,66
$Js(-27)$	0,41	1,00	0,20	-0,28	0,19
$Lod(0)$	-0,55	0,20	1,00	-0,10	-0,22
$dWs(-6)$	-0,32	-0,28	-0,10	1,00	-0,28
$dQ(0)$	0,66	0,19	-0,22	-0,28	1,00
Характеристики уравнения (4)	$Ts(as)$	$Js(-27)$	$lod(0)$	$dWs(-9)$	$dQ(0)$
$Ts(as)$	1,00	0,13	-0,78	-0,23	0,49
$Js(-27)$	0,13	1,00	0,20	-0,27	0,19
$lod(0)$	-0,78	0,20	1,00	-0,03	-0,22
$dWs(-9)$	-0,23	-0,27	-0,03	1,00	-0,28
$dQ(0)$	0,49	0,19	-0,22	-0,28	1,00

Статистические характеристики уравнений (3) и (4) приведены в табл. 7. Коэффициенты детерминации уравнений (3) и (4) равны 0,80 и 0,78. Стандартная ошибка расчетов по уравнениям составляет $\Delta Tz(as) = 0,46$ °C и $\Delta Ts(as) = 0,48$ °C при стандартном отклонении температуры $\sigma_t = 1,00$ °C. Для предикторов уровень значимости p -level меньше 0,01, кроме предиктора $dWs(-1)$ в уравнении (3), для которого p -level = 0,02, но меньше 0,05. Критерий Фишера F намного больше критического значения $F_{кр}$. Из оценок статистических критериев следует, что уравнения (3) и (4) статистически значимы и адекватно описывают долговременную изменчивость температуры воздуха $Tz(as)$ и $Ts(as)$.

В табл. 7 приведены оценки вклада разных факторов в дисперсию предиктантов. Как видно, дисперсия $Tz(as)$ в равной пропорции определяется колебаниями инсоляционной контрастности (индекс dQ) и скоростью вращения Земли (индекс $lod(0)$). В меньшей степени она зависит от изменчивости диссиметрии Солнечной системы (параметр $Js(-27)$) и флуктуаций разности поступающей от Солнца энергии в 10-й и 0-й годы (индекс $dWs = Ws(0) - W(-10)$).

Таблица 7

Статистические характеристики уравнений (3) и (4) за период 1902—2020 гг.

Statistical characteristics of equations (3) and (4) for the period 1902—2020

$Tz(as)$: $R = 0,891$; $R^2 = 0,80$; $F = 110,6$; $F_{кр} = 4,1$; $\Delta Tz(as) = 0,46$ °C; $\sigma_T = 1,00$ °C			$Ts(as)$: $R = 0,88$; $R^2 = 0,78$; $F = 101,3$; $F_{кр} = 4,1$; $\Delta Ts(as) = 0,48$ °C; $\sigma_T = 1,00$ °C		
Параметры уравнения (3)	<i>p-level</i>	Вклад, %	Параметры уравнения (4)	<i>p-level</i>	Вклад, %
$dQ(0)$	0,00	28	$dQ(0)$	0,00	12
$lod(0)$	0,00	30	$lod(0)$	0,00	60
$Js(-27)$	0,00	17	$Js(-27)$	0,00	3
$dWs(-6)$	0,02	5	$dWs(-9)$	0,00	3

В дисперсию $Ts(as)$ доминирующий вклад вносят колебания скорости вращения Земли (индекс $lod(0)$). В пять раз меньше вклад колебаний инсоляционной контрастности (индекс dQ) и совсем малый вклад приходится на индексы $Js(-27)$ и $dWs(-1)$.

На рис. 2 приведены графики рассчитанных по уравнениям (3) и (4) фактических и вычисленных значений температуры воздуха в Арктике в широтной зоне 70—85° с.ш. и на акватории арктических морей. Из рис. 2 видно, что изменчивость

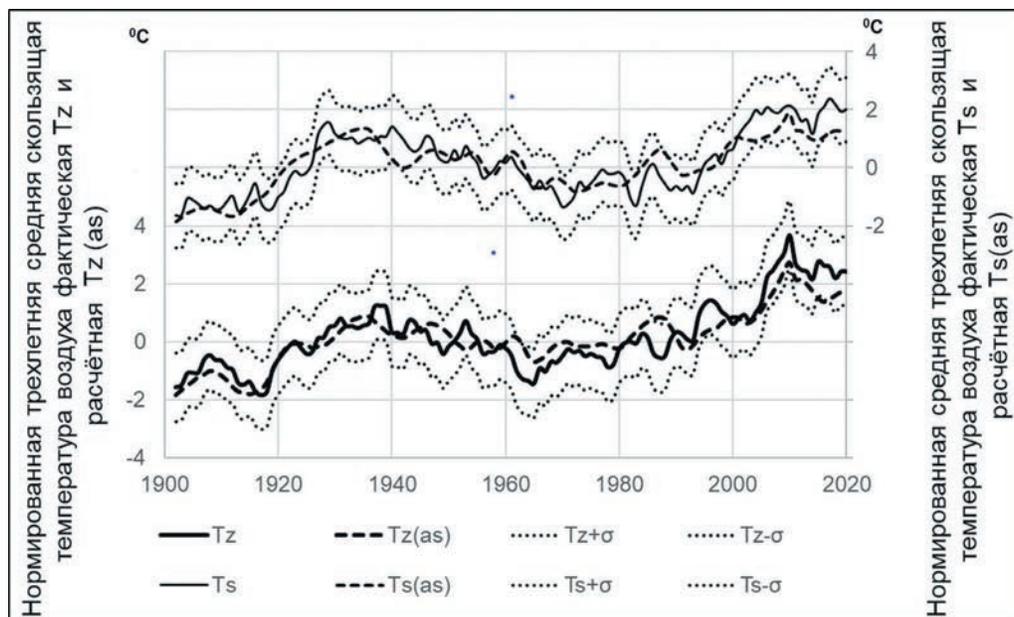


Рис. 2. Сравнение трехлетних скользящих средних значений аномалий температуры воздуха: фактических (Tz , Ts) и вычисленных $Tz(as)$, $Ts(as)$ по уравнениям (3) и (4).

Fig. 2. Comparison of the actual (Tz , Ts) and calculated by equations (3) and (4) three-year moving averages of air temperature anomalies ($Tz(as)$, $Ts(as)$).

средней трехлетней скользящей температуры воздуха в Арктике хорошо воспроизводится моделями (3) и (4), в которых в качестве предикторов используются астрогеофизические параметры. Расчетные кривые на рис. 2 не выходят за пределы границ от $Tz - \sigma$ до $Tz + \sigma$ и от $Ts - \sigma$ до $Ts + \sigma$ за исключением двух годов. В 2015 г. и 2016 г. расчетная температура $Tz(as)$ выходит за пределы $Tz - \sigma$ на 0,07—0,10 °С, а расчетная температура $Ts(as)$ в 2017 г. выходит за пределы $Ts - \sigma$ на 0,08 °С. По результатам оценок, можно говорить о возможности прогнозирования температуры воздуха, по крайней мере, на 2—3 года.

Обсудим возможный механизм влияния астрогеофизических факторов на температуру. Согласно работе [24], увеличение широтного градиента глобальной температуры воздуха при увеличении межширотного градиента инсоляции индуцирует усиление переноса энергии (тепла) из экваториальной области к полярным районам, т. е. при положительных аномалиях dQ будет увеличиваться температура воздуха в арктической зоне и наоборот. Выше также было указано, что широтный градиент глобальной температуры воздуха коррелирует с инсоляционной контрастностью, а контрастность температуры между севером и югом управляет атмосферной циркуляцией Земли и ветровой циркуляцией океана [31].

Влияние угловой скорости вращения Земли на поверхностную температуру воздуха рассматривалось во многих работах [24, 25, 26, 28, 29]. По Б. А. Слепцову-Шевлевичу и А. М. Бояринову [25], влияние скорости вращения Земли на температуру воздуха происходит следующим образом. При замедлении скорости вращения Земли (увеличение индекса lod) на полюсах наблюдается вспучивание поверхности океана и атмосферы, а на экваторе, наоборот, проседание. Уровень океана и атмосферы, возникший вследствие замедления вращения Земли, уменьшается от полюса к экватору, вследствие чего геострофический поток водных и воздушных масс направлен на юго-запад, уменьшая температуру воздуха полярной области, как это и следует из уравнений (3) и (4) при положительной аномалии индекса lod . При уменьшении индекса lod (ускорение вращения Земли) вспучивание океана наблюдается на экваторе, и уменьшение высоты «ротационного прилива» от экватора к полюсу сопряжено с формированием геострофического переноса масс в северо-восточном направлении, которое способствует увеличению температуры воздуха на севере. Б. Г. Шерстюков [28, 29] полагает, что механизм влияния астрогеофизического индекса lod таков: «замедление вращения (увеличение lod) сопровождается в Северном полушарии ослаблением выноса тепла из низких широт в высокие (температура понижается) и наоборот».

Более подробно механизм влияния вращения Земли на климат рассмотрен в работе Н. С. Сидоренкова [26]. Отметим, что его результаты полностью соответствуют результатам указанных выше авторов: при ускорении скорости Земли температура повышается, при замедлении — понижается. При этом показано, что корреляция между угловой скоростью и аномалиями ТВ северного полушария при десятилетнем осреднении равна 0,81, а для зоны 85—30° с.ш. она возрастает до 0,91.

Влияние изменений суммарного момента инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы J_s , по Б. Г. Шерстюкову [29],

происходит следующим образом. За счет гравитационного влияния больших планет возникает диссиметрия Солнечной системы, которая индуцирует неучтенные составляющие в движении Земли. Воздействие неучтенных движений Земли и, как следствие, неучтенных сил могут регулировать циркуляцию вод океана, теплообмен в системе океан – атмосфера и межширотный теплообмен. Увеличение суммарного момента инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы (индекс J_s) сопровождается увеличением температуры воздуха в Арктике. Тем не менее, механизм влияния индекса J_s на температуру воздуха еще нуждается в раскрытии.

Влияние изменений разности поступающей от Солнца радиации в 0-й и 10-й годы dWs может осуществляться как прямым воздействием радиации, так и через изменение атмосферной циркуляции [37]. Возможно, в первом приближении, этот индекс воспроизводит структуру квазидвадцатилетнего цикла вариации инсоляции [24]. С увеличением разности поступающей от Солнца энергии dWs (при увеличении $Ws(0)$ или уменьшении $Ws(-10)$), где Ws — трехлетние скользящие числа Вольфа, происходит увеличение температуры воздуха, что и следует из уравнений (3) и (4).

Сравнивая статистические модели (1), (2) с уравнениями (3), (4), видим, что достоверность описания Tz несколько лучше при использовании гидрометеорологических характеристик ($R^2 = 0,80$), чем с использованием астрогеофизических параметров ($R^2 = 0,77$). Достоверность описания Ts лучше при использовании в качестве предикторов астрогеофизических факторов ($R^2 = 0,77$), чем гидрометеорологических ($R^2 = 0,74$). Но преимущество статистических уравнений (3), (4) перед гидрометеорологическими факторами состоит в том, что такие астрогеофизические параметры, как dQ и J_s , рассчитаны на многие десятилетия вперед [24, 29], а индексы dWs и lod на 20—50 лет [38, 39]. Это обстоятельство служит основанием возможности использования статистических моделей (3) и (4) для прогноза температуры воздуха с использованием в качестве предикторов астрогеофизических факторов на длительный срок.

К оценке возможных изменений температуры воздуха в Арктике в ближайшие десятилетия

Недостаток знаний о механизмах долговременных изменений природных процессов, климата, внутривековых колебаний состояния атмосферы, океана и ледяного покрова является определенным препятствием для разработки сверхдолгосрочного прогноза состояния атмосферы, океана и ледяного покрова. Одним из направлений решения этой проблемы может служить аппарат множественной линейной и нелинейной регрессии для разработки адекватных статистических моделей изменений гидрометеорологических характеристик. Для построения статистических моделей долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике в качестве предикторов могут быть использованы внешние по отношению к Земным сферам астрогеофизические факторы, которые обладают перед гидрометеорологическим параметрами серьезным преимуществом. Оно состоит в том, что

их прогноз на длительный срок крайне сложен. К близкому выводу ранее пришли авторы А. И. Воскресенский и др. [10]. Повторим их тезис: «... В ближайшее время преобладать в флуктуациях климата будут все же естественные его изменения. Поэтому для оценки возможных изменений приземной температуры воздуха надо полагаться на факторы, вызывающие естественную изменчивость климата. Наиболее приемлемыми из них являются внешние по отношению к климатической системе Земли факторы».

Отметим, что при построении метода сверхдолгосрочного предвычисления температуры воздуха на основе статистических моделей важно проверить, насколько модели теряют точность при переходе к расчетам по независимым данным, т. е. исследовать устойчивость статистических уравнений по значениям предикторов, которые не использовались в обучающей выборке. В качестве обучающей выборки был определен период 1902—2010 гг., для которого были получены следующие статистические уравнения:

$$exTz = 0,366dQ - 0,736lod(-1) + 0,478Js(-27) - 0,136dWs(-1); \quad (5)$$

$$exTs = 0,157dQ - 0,882lod(0) + 0,190Js(-27) - 0,146dWs(-1). \quad (6)$$

По структуре уравнения (5) и (6), полученные по более коротким рядам, мало отличаются от уравнений (3) и (4). Величины коэффициентов детерминации незначительно меньше: для $exTz$ на 0,02 меньше, а для $exTs$ на 0,03 по сравнению с $Tz(as)$ и $Ts(as)$ соответственно (табл. 6). Отношение стандартной ошибки расчетов в интервале 2010—2020 гг. к стандартному отклонению ряда 1902—2010 гг. составили 0,29 и 0,30 для уравнений (5) и (6) соответственно, что свидетельствует о высокой точности расчета значений температуры воздуха по обучающей выборке.

По уравнениям (5) и (6) были выполнены расчеты температуры воздуха по зависимым предикторам (1902—2010 гг.) и по независимым (2011—2020 гг.). Результаты расчетов приведены на рис. 3, на котором штрихпунктирными вертикальными линиями показан интервал расчетов по независимым предикторам. На рис. 3 видно, что расчетные кривые неплохо воспроизводят фактические колебания температуры, но в отдельных случаях ошибки расчета достигают 1 °С и более. Например, для Tz в 2016 г. абсолютная величина ошибки достигала 1,26 °С при среднеквадратическом отклонении для всего ряда 1,22 °С, а для Ts в 2018 г. абсолютная величина ошибки расчета равнялась 1,14 °С при среднеквадратическом отклонении для всего ряда 0,82 °С.

Устойчивость статистических уравнений (5) и (6), по крайней мере на период 10 лет вперед, позволяет надеяться на определенную устойчивость уравнений (3) и (4). Основываясь на выполнении этого условия, по этим уравнениям было сделано предвычисление температуры воздуха с 2021 г. по 2043 г.

При расчетах для периода 1902—2020 гг. и предвычислении на период 2021—2045 гг. были использованы рассчитанные значения предикторов dQ , $Js(-27)$. Для периода 1902—2020 гг. использовались фактические данные индексов $lod(-1)$ и $dWs(-8)$, а для периода 2021—2045 гг. использовались данные прогнозов [38, 39]. На рис. 4 приведены фактические и расчетные для временного

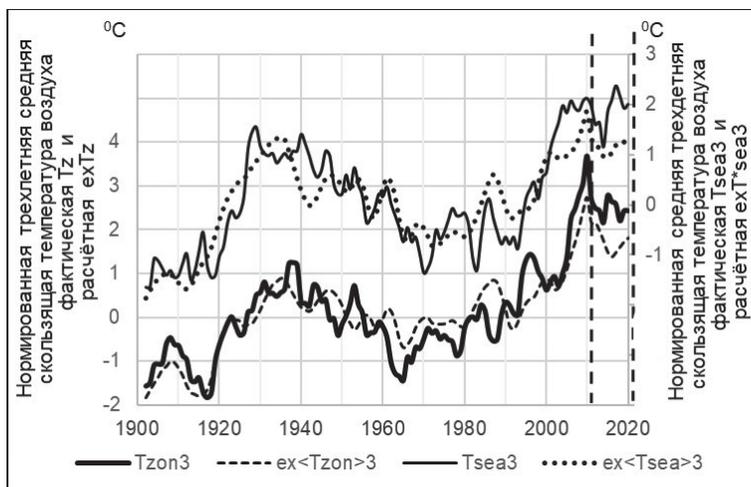


Рис. 3. Сравнение трехлетних скользящих средних аномалий температуры воздуха: фактических T_z , T_s и рассчитанных $exT_z(as)$, $exT_s(as)$ по уравнениям (5) и (6) за период 1902—2010 гг.

Fig. 3. Actual T_z , T_s and calculated according to equations (5) and (6) for a number of years 1902—2010 average three-year sliding air temperatures $exT_z(as)$, $exT_s(as)$.

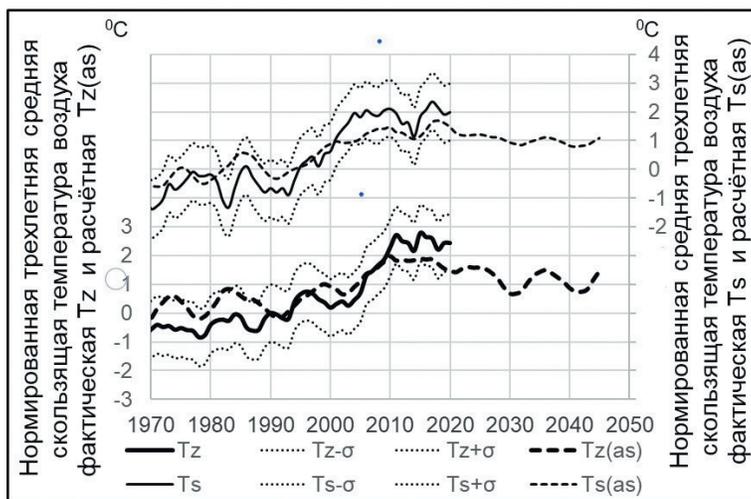


Рис. 4. Сравнение трехлетних средних скользящих значений температуры воздуха: фактических T_z , T_s и рассчитанных exT_z , exT_s по уравнениям (3) и (4) за период 1902—2020 гг.; а также прогностические значения температуры на период 2021—2043 гг.

Fig. 4. The actual T_z , T_s and calculated by equations (3) and (4) for the period 1902—2020 the average three-year sliding values of air temperature exT_z , exT_s ; as well as the calculated temperature values for the period 2021—2043.

интервала 1970—2020 гг. по зависимой выборке средние трехлетние скользящие температуры воздуха в широтной зоне $70\text{—}85^\circ$ с.ш. и в морской части морей российской Арктики, а также предвычисленные значения температуры на период 2021—2043 гг.

Расчетные аномалии температуры воздуха в широтной зоне $70\text{—}85^\circ$ с.ш. в общем согласуются с многолетней изменчивостью фактической температуры Tz . Но в 1975 г. и 1984 г. расчетные аномалии температуры были намного выше фактических, а в 2011 г. и 2015 г. расчетные аномалии температуры оказались намного ниже фактических. Расчетные значения аномалий температуры воздуха в арктических морях также оказались выше фактических в 1983 г. и намного ниже фактических аномалий в 2005 г. Эти отдельные факты расхождения расчетных и фактических аномалий температуры требуют дальнейшего анализа причин больших различий.

Вместе с тем отмечаем, что средняя квадратическая ошибка расчета Δ за период 1902—2020 гг. меньше среднеквадратического отклонения фактических значений и составляет 50 % для температуры Tz и 54 % для температуры Ts . На рис. 4, где пунктирными линиями обозначены области $Tz - \sigma$, $Tz + \sigma$ и $Ts - \sigma$, $Ts + \sigma$, расчетные кривые $exTz$, $exTs$ не выходят за пределы указанных областей, за исключением единичных случаев. Следовательно, значения температуры воздуха, рассчитанные по астрогеофизическим параметрам, удовлетворительно описывают тенденции долговременных изменений температуры воздуха в Арктике в интервале 1902—2020 гг.

Результаты расчетов на период 2021—2043 гг. демонстрируют слабый отрицательный тренд температуры, на фоне которого наблюдаются циклические колебания с периодом 10—15 лет с максимумом около 2024 г. и 2036 г. и минимумом около 2030 г. и 2041 г. (рис. 4). Но пределы изменения температуры предполагаются аналогичными периоду 2000—2020 гг. с амплитудой около $1,0^\circ\text{C}$.

Характер изменения температуры воздуха в морской части морей российской Арктики по расчетным оценкам в 2021—2043 гг. подобен колебаниям температуры воздуха в широтной зоне, но амплитуда межгодовых колебаний меньше, около $0,5^\circ\text{C}$ (рис. 4).

Полученные нами результаты изменений температуры воздуха в Арктике близки к оценкам, опубликованным в работах [24, 29, 40]. А. А. Дмитриев и др. [40] разработали климатический сценарий по умеренным и высоким широтам Северного полушария на весь XXI век, составленный на основании полученных связей по трем главным составляющим планетных циклов колебаний температуры. По расчетам авторов, до 2105 г. тренд температуры воздуха будет отрицательным, на фоне которого будут наблюдаться циклические колебания. Так, минимум температуры воздуха будет приходиться на 2025 г. и 2045 г., а максимумы — на 2020 г. и 2035 г. В работе [29] на основе авторской статистической модели приводятся прогностические расчеты аномалий температуры воздуха по Северному полушарию. Ожидается, что к 2040 г. температура вернется к состоянию 2000—2015 гг., и наступит временная стабилизация климата.

Заключение

В результате использования статистического анализа подтверждена связь долговременных колебаний температуры воздуха с аналогичными изменениями гидрометеорологических характеристик. В статистических моделях для температуры воздуха в Арктике предикторами являлись ледовитость арктических морей, индекс АМО (показатель теплового состояния Северной Атлантики) и сумма западной и восточной форм циркуляции атмосферы по классификации Вангенгейма. Гидрометеорологические характеристики определяют 80 % общей дисперсии температуры воздуха в широтной зоне 70—85° с.ш. и 74 % общей дисперсии температуры воздуха на акватории арктических морей.

Установлена связь долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике с изменениями ряда астрогеофизических факторов. В статистические модели долговременных колебаний температуры воздуха вошли следующие предикторы: индекс инсоляционной контрастности (или широтный градиент инсоляции), продолжительность суток (индекс вращения Земли), момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы и разность поступающей от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы. Астрогеофизические характеристики определяют 77 % общей дисперсии температуры воздуха в широтной зоне 70—85° с.ш. и 77 % общей дисперсии температуры воздуха на акватории арктических морей.

С использованием астрогеофизических факторов по статистическим моделям были выполнены расчеты температуры воздуха до 2043 г. Исходя из полученных оценок, вероятно, температура воздуха в арктической зоне 70—85° с.ш. к 2040 г., будет понижаться, сохраняя межгодовые вариации. Но пределы изменения температуры предполагаются аналогичными периоду 2000—2020 гг. с амплитудой около 1,0 °С. По расчетам в морской части морей российской Арктики характер изменения температуры воздуха в 2021—2043 гг. будет подобен колебаниям температуры воздуха в широтной зоне, но амплитуда межгодовых колебаний меньше, около 0,5 °С.

Разработанные статистические модели долговременных изменений температуры воздуха в Арктике, включающие астрогеофизические переменные в качестве предикторов, удовлетворительно описывают тенденции долговременных изменений температуры воздуха в Арктике. Но расхождения расчетных и фактических аномалий температуры в период 2015—2020 гг. являются предметом дискуссии и требуют дальнейшего анализа причин этих различий. Расхождения могли возникнуть из-за неучета дополнительных астрогеофизических факторов, вследствие неучета парникового эффекта, влияющего прежде всего на формирование трендов [12], но также как результат вычислительных особенностей линейного метода множественной регрессии. Так, если принять тренд в температуре воздуха Арктики неизменным в ближайшие десятилетия, то T_z увеличится на 0,6 °С к 2030 г. по сравнению с 2020 г., а к 2040 г. — на 1,2 °С. Учет тренда приводит к заметному росту значений T_z , рассчитанных по уравнению (3). Однако насколько реально постоянство тренда, судить сложно.

Выполненное исследование подтверждает сопряженность долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике и астрогеофизических факторов. Применение физико-статистического подхода к моделированию долговременных

колебаний характеристик состояния Арктики с включением в предикторы астрогеофизических параметров может служить хорошим основанием для развития методов долгосрочного расчета и прогноза характеристик климатического состояния Арктики.

Список литературы

1. Алексеев Г. В. Современное состояние климатической системы морской Арктики // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 10—19.
2. Иванов В. В., Алексеев Г. А. Атмосферная циркуляция и развитие атмосферных процессов в морской Арктике // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 20—34.
3. Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, Евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология, 2005. №6. С. 5—14.
4. Юлин А. В. Климатическая изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане и российских арктических морях // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 132—141.
5. Аксенов П. В., Иванов В. В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Том 64. № 1. С. 42—54. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
6. Тимохов Л. А., Блошкина Е. В. Термохалинная структура арктических морей в 1986-2015 гг. // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 204—250.
7. Scafetta N. Climate Change and Its causes: A Discussion about Some Key Issues *La Chimica e l'Industria* 1, 2010. P. 70—75.
8. Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.
9. Алексеев Г. В., Подгорный И. П., Священников П. Н. и др. Особенности формирования климата и его изменчивости в полярной климатической системе атмосфера-морской лед-океан // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 4—29.
10. Воскресенский А. И., Баранов Г. И., Долгин М. И. и др. Оценка возможных изменений климата атмосферы в Арктике до 2005 г. с учетом антропогенных факторов // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 30—61.
11. Виноградов Н. Д., Дмитриев А. А., Болотинская М. С. и др. Влияние изменения циркуляции атмосферы на климат // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 62—94.
12. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Report. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller, Cambridge; N. Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
13. Raval A., Ramanathan V. Observational determination of the greenhouse effect // *Nature*. 1989. V. 342. No. 6251. P. 758—761. DOI: 10.1038/342758a0.
14. Boer G. J. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets // *Climate Dynamics*. 1993. V. 8. No. 5. P. 225—239. DOI: 10.1007/BF00198617.
15. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Меридиональная изменчивость параметров климатической системы Атлантического океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 269—291.
16. Малинин В. Н., Вайновский П. А., Гордеева С. М. О взаимосвязи межгодовой изменчивости параметров тепло- и влагообмена системы «океан – атмосфера» во внутритропической зоне

- конвергенции зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20 №4, С. 281—296. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-281-296.
17. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Тренды компонент влагообмена в системе «океан – атмосфера» в условиях глобального потепления по данным архива Reanalysis-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 9—25. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-9-25.
 18. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. №64. С.407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407—434.
 19. Алексеев Г. В. Роль циркуляции атмосферы и других факторов в формировании климата Арктики // Формирование и динамика современного климата Арктики / Под ред. проф. Г. В. Алексеева. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. С. 27—46.
 20. Flournou M. D., Feldstein S. B., Lee S., Clothiaux E. E. Exploring the tropically excited Arctic warming mechanism with station data: Links between tropical convection and Arctic downward infrared radiation // Journal of the Atmospheric Sciences. 2016. Vol. 73. No. 3 P.1143—1158.
 21. O'Brien Ch., Foster G. L., Martnez-Botn M. A. et al. High sea surface temperatures in tropical warm pools during the Pliocene // Nature Geoscience. 2014. No. 7. P. 606—611. DOI: 10.1038/NGEO2194.
 22. Previdi M., Smith K. L., Polvani L. M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying Mechanisms // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. P. 1—25. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.
 23. Матвеев Л. Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 295 с.
 24. Федоров В. М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2018. 232 с.
 25. Слепцов-Шевлевич Б. А., Бояринов А. М. Солнечный ветер, вращение Земли и климат. Санкт-Петербург: 2002. 159 с.
 26. Сидоренков Н. С. Физика неустойчивости вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 380 с.
 27. Сидоренков Н. С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера, 2015. Т. 15. №3. С. 5—26.
 28. Шерстюков Б. Г., Салугавили Р. С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Труды Всероссийского научно-иссл. института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. 2010. Вып. 175. С. 43—51.
 29. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск. 2021. 221 с.
 30. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 447 с
 31. Davis B. A. S., Brewer S. A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth's latitudinal insolation/temperature gradient // Quaternary Science Reviews. 2011. Vol. 30. P. 1861—1874. DOI 10.1016/j.quascirev.2011.04.016
 32. Логинов В. Ф. Космические факторы климатических изменений. Минск, 2020. 168 с.
 33. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа. СПб: Наука. 2007. 135 с.
 34. Федоров В. М., Гребенников П. Б. Инсоляционная контрастность Земли и изменение площади морских льдов в Северном полушарии // Арктика: экология и экономика. 2018, №4(32). С. 86—94. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94.
 35. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки РГТМУ. 2018. № 53. 35—54.
 36. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск. Изд-во ПИПРО. 2003. 129 с.
 37. Егоров А. Г. Солнечный цикл и два режима многолетнего изменения приземного давления в высоких и умеренных широтах северного полушария Земли в зимний период // Доклады Академии Наук. 2007. Т. 414. № 3. С. 402—407.
 38. Solar cycle progression. Space weather prediction center, NOAA, 2022. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.
 39. Earth Rotation — the Change in the Length of Day and Delta T.pdf. HM Nautical Almanac Office, <https://astro.ukho.gov.uk/>.

40. Дмитриев А. А., Беязо В. А., Гудошников Ю. П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб: Издательство Политехнического университета. 2011. 231 с.

References

1. Alekseev G. V. Current state of the climate system of the marine Arctic. In: *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions* / Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021: (10—19). (In Russ.).
2. Ivanov V. V., Alekseenkov G. A. Atmospheric circulation and development of atmospheric processes in the marine Arctic. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions* / Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021: (20—34). (In Russ.).
3. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Frolov I. E. Intra-century changes in climate, ice cover area, Eurasian Arctic seas and their possible causes. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2005; (6): (5—14). (In Russ.).
4. Yulin A. V. Climatic variability of ice area in the Arctic Ocean and Russian Arctic seas. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions* / Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021; (132—141). (In Russ.).
5. Aksenov P. V., Ivanov V. V. “Atlantification” as a probable reason for the reduction of sea ice in the Nansen basin in the winter season. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 2018; 64(1): 42—54. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54 (In Russ.).
6. Timokhov L. A., Bloskhina E. V. Thermohaline structure of the Arctic seas in 1986—2015. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions*. Ed. I.M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021; (204—250). (In Russ.).
7. Scafetta N., Climate Change and Its Causes, a Discussion about Some Key Issues, SPPI Original Paper, Science and Public Policy Institute, Haymarket, 2010; 1—56.
8. *Klimaticheskijy rezhim Arktiki na rubezhe XX i XXI vv = Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries* / Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1991: 200 p. (In Russ.).
9. Alekseev G. V., Podgorny I. P., Priestnikov P. N. et al. Features of climate formation and its variability in the polar climate system atmosphere-sea ice-ocean. *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries*. Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991; (4—29). (In Russ.).
10. Voskresensky A. I., Baranov G. I., Dolgin M. I. et al. Assessment of possible changes in the Arctic atmospheric climate up to 2005 taking into account anthropogenic factors. *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries*. Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991;(30—61). (In Russ.).
11. Vinogradov N. D., Dmitriev A. A., Bolotinskaya M. S. et al. The influence of atmospheric circulation changes on climate. *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries*. Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991; (62—94). (In Russ.).
12. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Report. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller, Cambridge; N. Y.: Cambridge University Press. 2007: 996 p.
13. Raval A., Ramanathan V. Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*. 1989. 342(6251):758—761. DOI: 10.1038/342758a0.
14. Boer G. J. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets. *Climate Dynamics*. 1993; 8(5): 225—239. DOI: 10.1007/BF00198617.
15. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Meridional variability of the parameters of the Atlantic Ocean climate system. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2024; 21(3): (269—291). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-269-291. (In Russ.).
16. Malinin V. N., Vainovsky P. A., Gordeeva S. M. On the relationship between the interannual variability of heat and moisture exchange parameters of the “ocean-atmosphere” system in the intertropical convergence zone. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current*

- problems in remote sensing of the earth from space. 2023; 20(4): (281—296). DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-281-296. (In Russ.).
17. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Trends of moisture exchange components in the ocean-atmosphere system under conditions of global warming according to the Reanalysis-2 archive. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2021; 18(3): (9—25). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-9-25. (In Russ.).
 18. Ivanov V. V. Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Гидрометеорология и экология*. 2021; (64): 407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407—434. (In Russ.).
 19. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L. et al. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *Int. J. Climatol.* 2019; (39):3582—3592. DOI: 10.1002/joc.6040.
 20. Fournoy M. D., Feldstein S. B., Lee S., Clothiaux E. E. Exploring the tropically excited Arctic warming mechanism with station data: Links between tropical convection and Arctic downward infrared radiation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2016;73 (3): 1143—1158.
 21. O'Brien Ch. L., Foster G. L., Martinez-Boti M. A. et. al. High sea surface temperatures in tropical warm pools during the Pliocene. *Nature Geoscience*. 2014;(7):606—611. DOI: 10.1038/NNGEO2194.
 22. Previdi M., Smith K. L., Polvani L. M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying Mechanisms. *Environ. Res. Lett.* 2021; (16): 1—25. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.
 23. Matveev L. T. *Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery i klimata Zemli = Theory of General Circulation of the Atmosphere and Climate of the Earth*. L.: Gidrometeoizdat, 1991: 295 p.
 24. Fedorov V. M. *Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli = Solar radiation and the Earth's climate*. Moscow: Fizmatgiz, 2018: 232 p. (In Russ.).
 25. Sleptsov-Shevlevich B. A., Boyarinov A. M. *Solnechnyy veter, vrashcheniye Zemli i klimat = Solar wind, Earth rotation and climate*. St. Petersburg: 2002:159 p. (In Russ.).
 26. Sidorenkov N. S. *Fizika nestabil'nosti vrashcheniya Zemli = Physics of instability of the Earth's rotation*. Moscow: Fizmatlit. 2002: 380 p. (In Russ.).
 27. Sidorenkov N. S. Celestial-mechanical causes of weather and climate change. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera = Geophysical processes and the biosphere*. 2015; 15(3): (5—26) (In Russ.).
 28. Sherstyukov B. G., Salugashvili R. S. New trends in climate change in the Northern Hemisphere of the Earth in the last decade. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issl. instituta gidrometeorologicheskoy informatsii – Mirovogo tsentra dannykh. = Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center*. 2010; (175): (43—51). (In Russ.).
 29. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'niye svyazi, prognozy = Vibrational climate system, resonances, long-distance communications, forecasts*. Obninsk: RIHMI-WDC. 2021:222 p. (In Russ.).
 30. Maksimov I. V. *Geofizicheskiye sily i vody okeana = Geophysical forces and waters of the ocean*. L.: Gidrometeoizdat, 1970: 447 p. (In Russ.).
 31. Davis B. A. S., Brewer S. A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth's latitudinal insolation/temperature gradient. *Quaternary Science Reviews*. 2011; 30:1861—1874. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.04.016>.
 32. Loginov V. F. *Kosmicheskiye faktory klimaticheskikh izmeneniy = Space factors of climate change*. Minsk. 2020:168 p. (In Russ.).
 33. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P. et al. *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskkiye izmeneniya ledyanogo pokrova Yevraziyskogo shel'fa = Scientific research in the Arctic. Vol. 2. Climatic changes in the ice cover of the Eurasian shelf*. St. Petersburg: Nauka. 2007: 135 p. (In Russ.).
 34. Fedorov V. M., Grebennikov P. B. Insolation contrast of the Earth and changes in the area of sea ice in the Northern Hemisphere. *Arctic: ecology and economics*. 2018; 4(32): (86—94). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94. (In Russ.).
 35. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the causes of the first warming of the Arctic in the twentieth century. *Uchenyye zapiski RSHU, = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (53):(35—54). (In Russ.).
 36. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fiziko-statisticheskyy metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Yevropeyskogo basseyna) = Physical-statistical method of forecasting*

- oceanographic characteristics (on the example of the North European basin)*. Murmansk, PINRO Publishing House. 2003: 129 p. (In Russ.).
37. Egorov A. G. Solar cycle and two regimes of long-term changes in surface pressure in high and temperate latitudes of the Earth's northern hemisphere in winter. *Doklady Akademii Nauk. = Reports of the Academy of Sciences*. 2007; 414(3): (402—407). (In Russ.).
38. Solar cycle progression. Space weather prediction center. NOAA. 2022. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
39. Earth Rotation — the Change in the Length of Day and Delta T.pdf. HM Nautical Almanac Office. <https://astro.ukho.gov.uk/>.
40. Dmitriev A. A., Belyazo V. A., Gudoshnikov Yu. P. *Ritmicheskiye kolebaniya zemnykh prirodnykh protsessov i ikh gravitatsionnaya obuslovlennost' = Rhythmic oscillations of natural processes on Earth and their gravitational determinacy*. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. 2011:231 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Тимохов Леонид Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела океанологии, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru.

Малинин Валерий Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Институт гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru.

Иванов Владимир Васильевич, к-т геогр. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией долгосрочных метеорологических прогнозов отдела ледового режима и прогнозов, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, v_ivanov@aari.ru.

Informations about authors

Timokhov Leonid A., Doctor of Physical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Oceanology, Arctic and Antarctic Research Institute, ltim@aari.ru.

Malinin Valery N., Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University, malinin@rshu.ru.

Ivanov Vladimir V., Candidate of Geography Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Long-term Meteorological Forecasts of the Department of Ice Regime and Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute, v_ivanov@aari.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.03.2024

Принята в печать 14.06.2024

The article was received on 14.03.2024

The article was accepted 14.06.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 474—506.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):474—506.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.509:[551.465.7+551.513]:004.94
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-474-506

Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо — Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе Глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей СМIP6

Илья Викторович Серых

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

Аннотация. Произведен анализ результатов экспериментов piControl и Historical климатических моделей Земной системы, участвующих в шестом этапе Проекта взаимного сравнения совместных моделей (СМIP6), на предмет их способности заблаговременно прогнозировать Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК). С помощью метода главных компонент показано, что Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), элементом которой является ЭНЮК, является главной модой межгодовых колебаний планетарных аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) у большинства моделей СМIP6. Найдены те модели СМIP6, которые воспроизводят западно-восточное распространение ГАО, при этом Эль-Ниньо и Ла-Нинья являются фазами данного процесса, благодаря чему эти события можно прогнозировать примерно с годовой заблаговременностью.

Ключевые слова: Эль-Ниньо — Южное колебание, модели СМIP6, прогноз Эль-Ниньо и Ла-Нинья, Глобальная атмосферная осцилляция, индекс-предиктор, главные компоненты.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2024-0017 «Долгопериодная эволюция океанской циркуляции и потоков на границе океан-атмосфера и роль океана в формировании климата».

Для цитирования: Серых И. В. Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо — Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе Глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей СМIP6 // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 474—506. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-474-506.

Original article

Assessing the forecast capability of the El Niño–Southern Oscillation with a one-year lead-time using the Global Atmospheric Oscillation based on the results of CMIP6 models

Ilya V. Serykh

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

Summary. Based on the results of the piControl and Historical experiments of CMIP6 models participating in the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), the fields of the 1st and 2nd principal components of the interannual global variability of surface air temperature (SAT) and atmospheric sea level pressure (SLP) anomalies were constructed, and the connections between them were investigated. It turned out that the 1st principal components of the studied models are associated with the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), and the 2nd with the Global Atmospheric Oscillation (GAO) phase, which is several months ahead of El Niño events. Therefore, it was shown that GAO, of which ENSO is an element, is the main mode of interannual planetary variability of SAT and SLP anomalies in most CMIP6 models.

The degrees of connections between EOF1 and EOF2 of the interannual global variability of SAT and SLP anomalies with the ENSO and GAO indices were assessed. CMIP6 models have been identified that have strong connections between EOF1 and ONI and GAO indexes. We also found those CMIP6 models whose combined EOF2 have strong relationships with the ENSO's predictor index (PGAO), which can be used to predict El Niño and La Niña events based on the west-east propagation of the GAO spatial structure.

Based on the analysis of the identified connections between EOF1, EOF2, ONI and PGO, the following CMIP6 models were selected, that reproduce the west-east spread of the GAO, with El Niño and La Niña being phases of this process, thanks to which these events can be predicted with approximately a year's lead-time, thereby overcoming the so-called spring predictability barrier of ENSO: AS-RCEC TaiESM1, CAMS CAMS-CSM1-0, CMCC CMCC-ESM2, CAS FGOALS-f3-L, FIO-QLNM FIO-ESM-2-0, MIROC MIROC6, MOHC HadGEM3-GC31-LL, MRI MRI-ESM2-0, NCAR CESM2-FV2, NCC NorESM2-LM, NOAA GFDL-ESM4, NUIST NESM3, SNU SAM0-UNICON, THU CIESM.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences on topic No. FMWE-2024-0017 “Long-term evolution of ocean circulation and flows at the ocean-atmosphere boundary and the role of the ocean in climate formation”.

Keywords: El Niño – Southern Oscillation, CMIP6 models, El Niño and La Niña forecast, Global Atmospheric Oscillation, predictor index, principal components.

For citation: Serykh I. V. Assessing the forecast capability of the El Niño–Southern Oscillation with a one-year lead-time using the Global Atmospheric Oscillation based on the results of CMIP6 models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):474–506. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-474-506.

Введение

Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) является сильнейшим межгодовым сигналом в глобальной климатической системе и ведущим источником сезонных прогнозов климата во всем мире [1]. Для прогноза ЭНЮК применяются динамические и статистические модели, которые позволяют оценить предсказуемость

и точность его прогнозирования, меняющиеся в зависимости от сезона [2, 3] и от десятилетия к десятилетию [4]. Междесятилетние изменения предсказуемости ЭНЮК в значительной степени связаны с медленно меняющимися условиями в океане, при этом краткосрочные атмосферные колебания часто ограничивают предсказуемость ЭНЮК в сезонных временных масштабах. Несмотря на постоянно совершенствующиеся модели и схемы их инициализации, качество предсказания ЭНЮК остается низким для прогнозов, проходящих через так называемый весенний барьер предсказуемости (spring predictability barrier — SPB) [5—8], поэтому считается, что система прогнозирования ЭНЮК, основанная исключительно на физических процессах Тихоокеанского бассейна, имеет ограничение менее одного года [9].

В [10, 11] разработана иерархия схем прогнозирования ЭНЮК, которая включает статистические схемы и физические модели. Статистические схемы, как правило, основаны на линейных статистических методах и могут быть разделены на модели, в которых в качестве предикторов используются низкочастотные колебания либо атмосферы (давление на уровне моря или приземный ветер), либо океана (температура поверхности или теплосодержание верхних слоев океана). Физические модели состоят из связанных моделей атмосферы и океана различной степени сложности, начиная от упрощенных моделей типа «мелкой воды» и заканчивая совместными моделями общей циркуляции.

С развитием совместных моделей, усовершенствованием схем инициализации и новыми теоретическими исследованиями достигнут определенный прогресс в прогнозировании ЭНЮК на временных масштабах от месяцев до сезонов [12]. При этом существуют два фундаментальных направления: совершенствование практических навыков прогнозирования и теоретическое изучение внутреннего предела предсказуемости. Первое включает в себя прогресс в совместных моделях, ассимиляции данных, ансамблевом прогнозировании и т. д., а второе фокусируется на усилиях по изучению оптимального роста ошибки и оценке внутреннего предела предсказуемости ЭНЮК. Но, несмотря на этот прогресс и существование целого ряда моделей, прогнозирующих динамику ЭНЮК, прогноз этого явления не всегда бывает успешен.

К атмосферным процессам важным для прогноза ЭНЮК относятся компоненты внутрисезонной тропической изменчивости — колебание Маддена-Джулиана и атмосферные экваториальные волны Россби [13]. Аномалии тихоокеанской атмосферной циркуляции в зимне-весенний период могут оказывать долгосрочное влияние на тропический климат следующего лета посредством передачи сигнала через температуру поверхности океана (ТПО). В [14] предложен индекс, основанный на данных о давлении на уровне моря (ДУМ) с февраля по март в области, окружающей Гавайи, и показано, что эта область является наиболее информативной частью более крупной структуры ДУМ, оказывающей отложенное воздействие на ЭНЮК посредством передачи сигнала через ТПО.

Тихоокеанская меридиональная мода (Pacific meridional mode — РММ) является ведущей модой взаимодействия океана и атмосферы в субтропиках северо-восточной части Тихого океана и играет важную роль в возникновении

ЭНЮК. В исследовании [15] рассмотрены характеристики моделей пятого и шестого этапов Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 5 and 6 — CMIP5/CMIP6) при воспроизведении РММ и её связи с ЭНЮК. Обнаружено, что в CMIP5/CMIP6 существует большой межмодельный разброс влияния весеннего состояния РММ на фазу ЭНЮК последующей зимой. Также РММ играет важную роль в модулировании развития ЭНЮК [16]. Некоторые модели CMIP6 могут правильно воспроизводить характеристики РММ, но демонстрируют противоречивое взаимодействие РММ с ЭНЮК из-за различий в обратных связях между ветром, испарением и ТПО.

Знание движущих сил ЭНЮК и лежащих в их основе механизмов имеет решающее значение для улучшения прогнозирования ЭНЮК, однако это еще остается предметом для исследований. Существующие дальние связи между тропиками Атлантического и Тихого океанов посредством взаимодействия атмосферы и океана в течение первого и последнего десятилетий XX века указывают на возможность прогнозирования ЭНЮК [17]. Понимание этой междесятилетней модуляции дальних связей Атлантики и Тихого океана может помочь улучшить прогнозы ЭНЮК и связанных с ним воздействий.

Используя совместную модель общей циркуляции океана и атмосферы, в [18] показано, что некоторые произошедшие события ЭНЮК можно ретроспективно предсказать с большой заблаговременностью. Так, состояние Эль-Ниньо зимой 1997/98 г. можно было приближенно предсказать с опережением примерно на 1,5 года, но со слабой интенсивностью и большой фазовой задержкой в прогнозе начала данного исключительно сильного события. Это связано с влиянием активных и интенсивных стохастических порывов западного ветра (westerly wind burst — WWB) [19] в период с конца 1996 г. по середину 1997 г., которые обычно непредсказуемы в сезонных временных масштабах.

С 2002 г. Международный научно-исследовательский институт климата и общества (International Research Institute for Climate and Society — IRI), позже в партнерстве с Центром прогнозирования климата (Climate Prediction Center — CPC), выпускает продукт мультимодельного прогнозирования ЭНЮК, неофициально называемый шлейфом прогнозирования ЭНЮК [20]. В работе [21] исследуются меры по повышению надежности и удобства использования этого продукта, включая поправки смещения и амплитуды, метод мультимодельного ансамбля, формулировку распределения вероятностей и формат выпускаемого продукта. В [22] дается оценка ретроспективным прогнозам ЭНЮК и прогнозам в режиме реального времени из системы Североамериканского мультимодельного ансамбля (North American Multi-Model Ensemble) для 1982—2015 гг. Проверка восьми отдельных моделей из этого ансамбля показывает, что у них несколько различаются навыки прогнозирования ЭНЮК: одни модели постоянно дают более успешные прогнозы, чем другие. В частности, амплитуды некоторых модельных прогнозов ЭНЮК оказываются слишком велики при пересечении весеннего предела предсказуемости (SPB).

В [23] описаны результаты большой выборки совместных ретроспективных прогнозов ЭНЮК за 1982—1998 гг., система прогнозирования которых основана

на модели CCSM3.0 Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research — NCAR) и системе усвоения океанических данных, предоставленной Лабораторией геофизической гидродинамики (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory — GFDL) Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA). Надежность системы прогнозирования ЭНЮК исследована как с детерминированной, так и с вероятностной точки зрения, причем выполнено её сравнение с действующей системой прогнозирования климата (Climate Forecast System — CFS) NOAA. После этого выполнено её объединение с CFS для создания мультимодельной системы прогнозирования. При использовании детерминированных и вероятностных метрик квалификации показано, что мультимодельная комбинация обычно столь же эффективна, как и модель, демонстрирующая лучшую способность прогнозирования ЭНЮК.

В настоящее время ЭНЮК можно достаточно хорошо предсказать с заблаговременностью вплоть до 6 месяцев, но в прогнозах в реальном времени остаются большие погрешности и неопределенности [24]. При этом используются различные подходы для улучшения понимания процессов ЭНЮК и разработаны различные модели для прогнозирования ЭНЮК, в том числе линейные статистические модели, основанные на анализе главных колебательных мод (principal oscillation pattern — POP) и сверточных нейронных сетях (convolutional neural networks — CNN). На основе метода искусственных нейронных сетей в [25] показана возможность прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их разделения на два типа: центрально- и восточно-тихоокеанский с заблаговременностью от 3 до 9 месяцев.

В [26] разработан метод, основанный на рекуррентной нейронной сети, называемой сетью эхо-состояний (echo state network — ESN), которую можно эффективно обучить для прогнозирования различных индексов ЭНЮК, несмотря на их относительно высокий уровень шума. Для этого модель ESN обучается низкочастотной изменчивости индексов ЭНЮК, затем оценивается потенциальная будущая высокочастотная изменчивость по конкретным образцам её прошлой истории. Этот метод раскрывает важность взаимодействий на различных временных масштабах в механизмах, лежащих в основе ЭНЮК.

В [27] предложена управляемая данными модель для анализа и прогнозирования пространственно распределенных временных рядов. Модель основана на линейной динамической моде (linear dynamical mode) декомпозиции наблюдаемых данных, которая получена из недавно разработанного подхода нелинейного уменьшения размерности. Ключевым моментом этого подхода является его способность учитывать простые динамические свойства наблюдаемой системы посредством выявления доминирующих временных масштабов системы. Этот метод применен к полю аномалий ТПО в тропическом поясе, где основным сигналом изменчивости является ЭНЮК.

Реакция ЭНЮК на глобальное потепление остается неопределенной, что ставит под сомнение прогнозы ЭНЮК в условиях потепления климата. В [28] исследуются изменения характеристик ЭНЮК и предсказуемость в идеализированном

моделировании с четырехкратным увеличением воздействия парниковых газов на основе семи моделей общей циркуляции. Показано, что изменчивость ЭНЮК ослабевает в более теплом климате по сравнению с контрольными экспериментами, при этом нейтральное состояние длится дольше, в то время как активные состояния ЭНЮК длятся короче и смещаются в сторону Ла-Нинья. При этом в условиях потепления шестимесячная предсказуемость ЭНЮК несколько снижается в пяти моделях и увеличивается в двух моделях.

Некоторые климатические модели демонстрируют систематические ошибки в представлении ЭНЮК, которые в значительной степени присутствуют в тропическом сезонном прогнозировании даже для коротких периодов заблаговременности [29]. Связанные с ЭНЮК прогнозируемые аномалии ТПО для зимы/весны значительно расширяются или смещаются к западу, а также слишком устойчивы во время фазы завершения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Результаты тестирования связанной с глобальными аномалиями системы прогнозирования ЭНЮК, включающей модель общей циркуляции и систему усвоения океанических данных, демонстрируют, что средние по ансамблю прогнозы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья полезны до заблаговременности 7—9 месяцев [30]. Таким образом, заблаговременное (более года) прогнозирование ЭНЮК до сих пор является важной и сложной научной задачей. Поскольку единая и полная теория ЭНЮК еще не создана, то для прогнозирования ЭНЮК с помощью соответствующих численных моделей используются связанные индикаторы, такие как индекс Niño3.4 и индекс Южного колебания (Southern Oscillation index — SOI). Однако поскольку ЭНЮК представляет собой очень сложное и динамичное явление, а индексы Niño3.4 и SOI смешивают много низкочастотных и высокочастотных компонентов, то точность предсказания современных численных методов прогнозирования ЭНЮК до сих пор остается достаточно невысокой [31].

В начале 2014 г. несколько прогностических систем прогнозировали сильное событие Эль-Ниньо, подобное 1997/1998 гг., для следующей зимы 2014/2015 гг. [32]. Конечным результатом стали небольшие положительные аномалии ТПО в тропиках Тихого океана. Напротив, следующей зимой 2015/2016 гг. произошло одно из самых сильных событий Эль-Ниньо за всю историю наблюдений, которое не было спрогнозировано в начале 2015 г. [20]. Таким образом, несмотря на продемонстрированную ретроспективную предсказуемость ЭНЮК, прогнозы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в реальном времени и связанных с ними явлений за пределами тропической части Тихого океана не всегда оправдываются. Существует необходимость более подробно рассмотреть предсказуемость аномальных особенностей вне тропиков Тихого океана, которые, как известно, связаны с ЭНЮК (например, индийские муссоны и осадки в Сахеле, засуха на юге Африки и ТПО вне тропиков) [11]. Кроме того, требуется установить относительную важность для ЭНЮК различных физических механизмов в океане и атмосфере. Сезонная зависимость предсказуемости ЭНЮК прослеживается во многих моделях, но ответственные за нее процессы до конца не изучены, а её значение до сих пор является предметом научных дискуссий. Более того, наблюдаются заметные междесятилетние различия в успешности прогнозов ЭНЮК, и причины этого все еще полностью не ясны.

В работах [33—39], по данным наблюдений, реанализам и моделям CMIP5, показано, что ЭНЮК является элементом планетарного явления, названного Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО). В работах [40, 41], по данным наблюдений и реанализам на основе западно-восточного распространения планетарной пространственной структуры ГАО, предложен механизм прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с примерно годовой заблаговременностью. В [42] показано, что некоторые из моделей CMIP6 воспроизводят планетарную структуру ГАО и демонстрируют сильные дальние связи ЭНЮК с аномалиями ТПО и ДУМ вне тропиков Тихого океана.

Целью данной работы является оценка возможности прогнозирования ЭНЮК моделями CMIP6 на основе западно-восточного распространения планетарной структуры ГАО с использованием ГАО как главной моды глобальной межгодовой климатической изменчивости.

Методика исследования

Исследованы глобальные среднемесячные значения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и атмосферного давления на уровне моря (ДУМ), полученные в результате преиндустриального контрольного (preindustrial control — piControl) и исторического (Historical) экспериментов климатических моделей Земной системы, входящих в CMIP6 [43]. Организации-разработчики, названия и основные характеристики анализируемых моделей CMIP6 представлены в табл. 1. Исследуемые модели выбраны, исходя из анализа сравнения внетропических дальних связей ЭНЮК в моделях CMIP6, а также отсутствия в результатах эксперимента piControl так называемого «дрейфа» [42].

В эксперименте piControl воздействие от каких-либо внешних сил является постоянным и находится на уровне преиндустриального периода. Единственной периодической внешней силой, воздействующей на климатическую систему в этом эксперименте, является годовой ход поступления тепла от Солнца. Благодаря этому в результатах эксперимента piControl должны практически отсутствовать длительные тренды изменения климата («дрейф»), и нет необходимости удалять эти тренды. Таким образом, в результатах эксперимента piControl присутствует только внутренняя естественная динамика климата, к которой и относится ЭНЮК.

Продолжительность эксперимента piControl для большинства моделей CMIP6 составляет 500 модельных лет и варьируется от 311 до 1200 лет, поэтому для тех моделей CMIP6, для которых это возможно, все вычисления были дополнительно повторены по сокращенным рядам единой длины (500 лет). Эти результаты оказались близки к результатам, полученным по данным различной продолжительности. Также дополнительно все результаты были рассчитаны отдельно для первых 150 лет и следующих за ними 150 лет эксперимента piControl.

Дополнительно для анализа устойчивости полученных результатов в условиях современного меняющегося климата были исследованы данные эксперимента Historical за 1850—2014 гг., в котором присутствует форсинг от изменения

концентрации парниковых газов в атмосфере, благодаря чему модели CMIP6 воспроизводят потепление климата последних десятилетий. Результаты, полученные по эксперименту Historical, оказались близки к результатам, полученным по эксперименту piControl.

Чтобы идентифицировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья использовался индекс, который называется океанический индекс Ниньо (Oceanic Niño Index — ONI). ONI представляет собой средние значения аномалий ПТВ в центральной-восточной части экваториального региона Тихого океана — регионе Niño3.4 (рис. 1 *a*). В каждом узле пространственной сетки отдельно взятой модели CMIP6 вычислены аномалии ПТВ и ДУМ относительного среднего годового хода за весь исследуемый период (далее — аномалии). Затем аномалии ПТВ усреднялись в регионе Niño3.4 (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170° — 120° з.д.), и полученный временной ряд сглаживался трехмесячным скользящим средним для получения своего собственного для каждой модели временного ряда ONI. Затем по полученным временным рядам ONI отдельно для каждой модели определялись события Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При Эль-Ниньо (Ла-Нинья) значения ONI должны непрерывно превышать $+0,5^\circ\text{C}$ (быть менее $-0,5^\circ\text{C}$) на протяжении пяти месяцев или более. В случае эксперимента Historical длительные изменения климата дополнительно подавлялись в ряде ONI с помощью тридцатилетнего фильтра Баттерворта высоких частот.

Для того, чтобы идентифицировать текущую фазу ГАО, использован индекс GAOI, который рассчитывается как алгебраическая комбинация нормированных значений аномалий ДУМ в десяти районах, совпадающих с максимумами и минимумами в пространственной структуре аномалий ДУМ поля ГАО, соответствующей по фазе максимуму событий Эль-Ниньо (рис. 2 *a*) [36, 44].

Для прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья используется индекс-предиктор, основанный на западно-восточном распространении пространственной структуры ГАО (Predictor GAO — PGO) [40, 41]. PGO опережает ONI и GAOI примерно на один год, и рассчитывается как алгебраическая комбинация нормированных значений средних аномалий ПТВ и ДУМ в пятнадцати районах поля ГАО, опережающей по фазе начало событий Эль-Ниньо.

Методам выделения главных мод климатической изменчивости посвящены работы разных авторов, например, анализ главных компонент (Principal Component Analysis — PCA) с использованием идеи нелинейности и теории динамических систем, который применен в [45]. Мы применили географически взвешенный PCA, именуемый методом разложения на эмпирические ортогональные функции (Empirical Orthogonal Function — EOF), для выделения главных глобальных мод изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ на межгодовых периодах колебаний собственных ГАО и ЭНЮК. Для этого была произведена предварительная полосовая фильтрация фильтром Баттерворта от двух до семи лет рядов аномалий ПТВ и ДУМ в каждом узле глобальной сетки данных. Полосовая фильтрация производилась для периодов от двух до семи лет, поскольку в [42] найдено, что именно в этом диапазоне наблюдаются наиболее высокие энергии колебаний индекса ONI моделей CMIP6. Также для подавления сильной изменчивости аномалий ПТВ и

ДУМ в высоких широтах по сравнению с тропиками временные ряды в каждом узле сетки были умножены на корень из косинуса широты этого узла. После этого к полученным фильтрованным и нормированным аномалиям ПТВ и ДУМ применен PCA для получения межгодовых первой и второй главных компонент (EOF1 и EOF2). Их анализ позволяет выбрать те модели CMIP6, у которых глобальные межгодовые EOF1 и EOF2 — это разные фазы одного и того же процесса, т. е. западно-восточного распространения ГАО. Связи между EOF1 и EOF2, а также между ними и ONI, GAO1 и PGAO затем оценивались с помощью взаимного спектрального и корреляционного анализа.

Результаты исследования

По результатам моделей CMIP6, указанным в табл. 1, построено среднemodelное поле первой главной компоненты (PC1 — пространственная структура EOF1) межгодовой изменчивости аномалий ПТВ (PC1 ПТВ) (рис. 1 а). При её построении для каждой модели в отдельности по нормированным и фильтрованным для периодов колебаний от двух до семи лет в каждом узле модельной сетки аномалиям ПТВ вычислены первые десять главных компонент. Найденные для каждой модели поля первой главной компоненты интерполированы на единую сетку $1^\circ \times 1^\circ$. Затем выполнено усреднение интерполированных полей PC1 ПТВ по выбранным моделям CMIP6.

Таблица 1

Основные характеристики моделей CMIP6 и кросс-корреляции 1-х главных компонент аномалий ПТВ и ДУМ с ONI и GAO1 по эксперименту Historical

Main characteristics of the CMIP6 models and cross-correlation of the 1st PCs of the SAT and SLP anomalies with ONI and GAO1 by Historical experiment

Разработчик модели	Название модели	Среднее разрешение модели (°ш. × °д.)	Вклад EOF1 ПТВ (%)	Вклад EOF2 ПТВ (%)	Вклад EOF1 ДУМ (%)	Вклад EOF2 ДУМ (%)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и GAO1	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ДУМ и GAO1 (месяцы)
AS-RCEC	TaiESM1	0,938 x 1,250	46,5	19,6	44,5	19,1	0,87	2	0,81	1
AWI	AWI-CM-1-1-MR	0,938 x 0,938	40,5	11,2	36,4	16,8	0,79	3	0,88	0
AWI	AWI-ESM-1-1-LR	1,875 x 1,875	36,4	11,6	29,4	16,8	0,75	3	0,77	0
BCC	BCC-CSM2-MR	1,125 x 1,125	30,2	10,2	31,8	19,2	0,80	2	0,83	0
BCC	BCC-ESM1	2,812 x 2,812	26,4	13,6	31,0	18,1	0,83	1	0,75	0
CAMS	CAMS-CSM1-0	1,125 x 1,125	43,0	12,1	34,8	21,3	0,78	2	0,75	0
CAS	CAS-ESM2-0	1,406 x 1,406	45,4	14,8	37,6	20,4	0,87	2	0,70	0
CAS	FGOALS-f3-L	1,000 x 1,250	50,6	14,2	47,1	15,1	0,89	3	0,79	0

Продолжение табл. 1

Разработчик модели	Название модели	Среднее разрешение модели (°ш. × °д.)	Вклад EOF1 ПТВ (%)	Вклад EOF2 ПТВ (%)	Вклад EOF1 ДУМ (%)	Вклад EOF2 ДУМ (%)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI (месяцы)
CAS	FGOALS-g3	2,250 x 2,000	44,6	10,8	41,3	17,1	0,82	2	0,84	0
CCCma	CanESM5	2,812 x 2,812	40,1	12,4	40,4	16,7	0,80	3	0,80	0
CCCma	CanESM5-CanOE	2,812 x 2,812	36,8	12,0	36,1	16,4	0,77	3	0,84	0
CCCR-ИИТМ	ИИТМ-ESM	1,915 x 1,875	39,1	15,6	33,9	21,4	0,78	2	0,78	0
CMCC	CMCC-CM2-SR5	0,938 x 1,250	42,2	12,2	42,3	13,6	0,85	3	0,86	0
CMCC	CMCC-ESM2	0,938 x 1,250	47,7	13,1	44,9	13,0	0,88	3	0,86	0
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1	1,406 x 1,406	39,7	11,7	35,6	20,3	0,84	3	0,85	0
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1-HR	0,500 x 0,500	33,0	13,7	27,2	22,6	0,70	2	0,42	0
CNRM-CERFACS	CNRM-ESM2-1	1,406 x 1,406	37,5	13,8	34,4	16,4	0,81	3	0,86	0
CSIRO-ARCCSS	ACCESS-CM2	1,250 x 1,875	33,4	14,3	32,6	16,6	0,79	2	0,72	0
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	1,241 x 1,875	33,2	10,7	34,5	16,5	0,75	3	0,85	0
E3SM-Project	E3SM-1-0	1,000 x 1,000	37,0	12,1	36,5	14,8	0,86	2	0,86	0
E3SM-Project	E3SM-1-1	1,000 x 1,000	36,0	11,5	35,9	17,8	0,82	2	0,86	0
E3SM-Project	E3SM-1-1-ECA	1,000 x 1,000	38,5	12,1	36,6	19,1	0,79	3	0,81	0
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	0,703 x 0,703	36,9	10,8	33,9	17,9	0,78	2	0,80	0
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3-AerChem	0,703 x 0,703	38,7	13,8	35,1	18,7	0,76	2	0,71	0
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3-Veg	0,703 x 0,703	41,0	11,7	36,0	19,1	0,82	2	0,82	0
FIO-QLNM	FIO-ESM-2-0	0,938 x 1,250	42,0	15,5	42,2	15,4	0,81	2	0,82	0
HAMMOZ-Consortium	MPI-ESM-1-2-HAM	1,875 x 1,875	38,8	11,9	33,6	16,6	0,83	2	0,79	0
INM	INM-CM4-8	1,500 x 2,000	30,9	12,4	23,6	20,1	0,55	1	0,09	-
INM	INM-CM5-0	1,500 x 2,000	30,2	11,6	25,0	21,4	0,67	1	0,70	0
IPSL	IPSL-CM6A-LR	1,259 x 2,500	45,1	10,0	38,9	20,0	0,81	2	0,83	0
KIOST	KIOST-ESM	1,875 x 1,875	42,3	12,5	39,5	22,9	0,82	3	0,70	0
MIROC	MIROC-ES2L	2,812 x 2,812	56,1	12,8	48,3	17,5	0,92	3	0,85	1
MIROC	MIROC6	1,406 x 1,406	49,0	12,6	45,0	15,3	0,90	3	0,89	0
MOHC	HadGEM3-GC31-LL	1,250 x 1,875	36,8	12,3	37,1	15,2	0,80	2	0,87	0

Разработчик модели	Название модели	Среднее разрешение модели (ш. × ° д.)	Вклад EOF1 ПТВ (%)	Вклад EOF2 ПТВ (%)	Вклад EOF1 ДУМ (%)	Вклад EOF2 ДУМ (%)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI (месяцы)
МОHC	HadGEM3-GC31-MM	0,556 x 0,833	37,0	15,1	36,3	16,8	0,84	3	0,74	0
МОHC	UKESM1-0-LL	1,250 x 1,875	40,9	13,9	40,7	14,0	0,83	3	0,89	0
МОHC	UKESM1-1-LL	1,250 x 1,875	40,3	12,2	40,7	14,1	0,86	3	0,88	0
MPI-M	MPI-ESM1-2-HR	0,938 x 0,938	36,0	10,7	34,3	16,6	0,83	2	0,76	0
MPI-M	MPI-ESM1-2-LR	1,875 x 1,875	44,2	9,2	35,8	19,3	0,87	2	0,90	0
MRI	MRI-ESM2-0	1,125 x 1,125	39,7	14,2	41,0	17,0	0,87	2	0,78	0
NASA-GISS	GISS-E2-1-G	2,000 x 2,500	52,6	16,9	51,2	16,6	0,88	4	0,76	1
NASA-GISS	GISS-E2-1-G-CC	2,000 x 2,500	52,2	16,0	51,3	14,3	0,87	3	0,74	1
NASA-GISS	GISS-E2-1-H	2,000 x 2,500	46,5	15,8	45,8	14,1	0,87	3	0,82	0
NASA-GISS	GISS-E2-2-H	2,000 x 2,500	35,7	11,9	32,2	21,4	0,79	1	0,57	0
NCAR	CESM2	0,938 x 1,250	44,8	14,6	42,5	17,3	0,86	3	0,86	0
NCAR	CESM2-FV2	1,875 x 2,500	49,6	17,7	47,6	16,5	0,89	3	0,88	0
NCAR	CESM2-WACCM	0,938 x 1,250	43,1	13,6	42,6	14,5	0,88	3	0,87	0
NCAR	CESM2-WACCM-FV2	1,875 x 2,500	47,7	17,3	45,5	17,0	0,89	2	0,85	0
NCC	NorCPM1	1,875 x 2,500	41,5	15,3	43,4	15,8	0,82	3	0,78	0
NCC	NorESM2-LM	1,875 x 2,500	42,4	15,5	42,6	14,9	0,82	3	0,85	0
NCC	NorESM2-MM	0,938 x 1,250	44,1	11,1	42,1	13,6	0,83	3	0,86	0
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	1,250 x 1,875	31,8	16,6	32,7	16,7	0,81	2	0,76	0
NOAA-GFDL	GFDL-CM4	1,000 x 1,250	38,3	12,8	38,8	14,0	0,83	2	0,88	0
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	1,000 x 1,250	44,6	9,8	44,4	14,8	0,85	2	0,89	0
NUIST	NESM3	1,875 x 1,875	38,3	12,4	34,7	18,1	0,80	1	0,80	0
SNU	SAM0-UNICON	0,938 x 1,250	39,7	15,8	40,4	13,4	0,87	2	0,86	0
THU	CIESM	0,938 x 1,250	45,0	13,4	41,4	14,3	0,84	3	0,87	0
UA	MCM-UA-1-0	2,250 x 3,750	30,7	12,9	29,3	18,1	0,81	1	0,78	0

Структура среднемодельной PC1 ПТВ (рис. 1 а) по своей форме во многих деталях повторяет глобальную структуру среднего поля разности аномалий ПТВ между противоположными фазами ЭНЮК по индексу ONI для исследуемых моделей CMIP6 [42] — планетарную структуру ГАО ПТВ. Исходя из этого, можно предположить, что ГАО и ее элемент ЭНЮК соответствуют главной моде глобальной климатической изменчивости аномалий ПТВ на межгодовых временных масштабах для большинства исследуемых моделей CMIP6. Вклад EOF1 в дисперсию находится в диапазоне 26—56 % (табл. 1, столбцы 4 и 6). Относительную степень

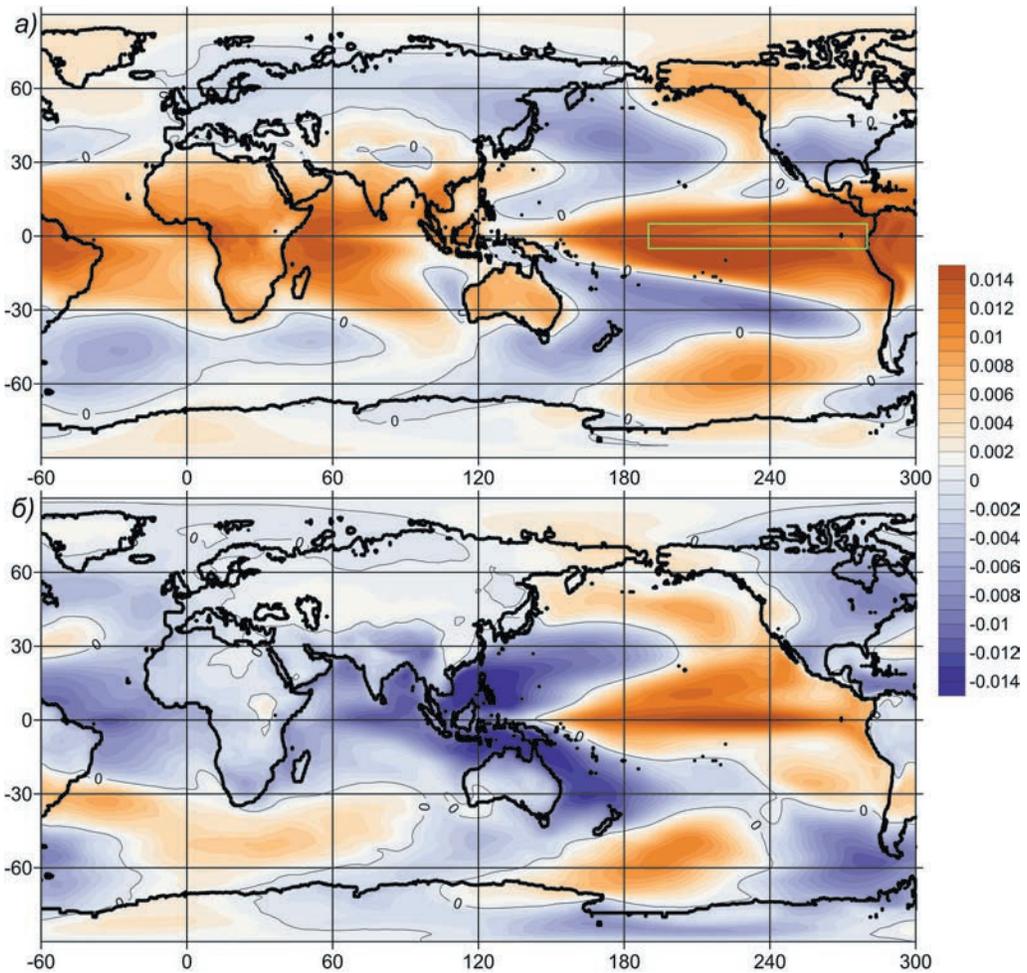


Рис. 1. Средние первая (а) и вторая (б) главные компоненты межгодовой изменчивости аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по 58 (а) и 23 (б) моделям СМIP6 (эксперимент Historical). Зеленым прямоугольником выделен регион, по которому вычисляется ONI.

Fig. 1. Average 1st (a) and 2nd (b) principal components of interannual variability of surface air temperature (SAT) anomalies for 58 (a) and 23 (b) CMIP6 models (Historical experiment). The green rectangle marks the region for which ONI is calculated.

этого соответствия для каждой модели в отдельности можно оценить по максимальным величинам взаимных корреляций между EOF1 ПТВ и ONI, и сдвигам при которых эти максимальные кросс-корреляции достигаются (табл. 1, столбцы 8—11).

Предположение о том, что ГАО есть главная мода глобальной климатической изменчивости исследуемых моделей СМIP6 на межгодовых временных

масштабах, подтверждает и среднемодельное поле первой главной компоненты межгодовой изменчивости аномалий ДУМ (PC1 ДУМ), вычисленное аналогичным PC1 ПТВ способом по результатам исследуемых моделей CMIP6 (рис. 2 *a*). Структура PC1 ДУМ также практически полностью соответствует планетарной структуре среднего поля разности аномалий ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК по индексу ONI для исследуемых моделей CMIP6 [42], т. е.

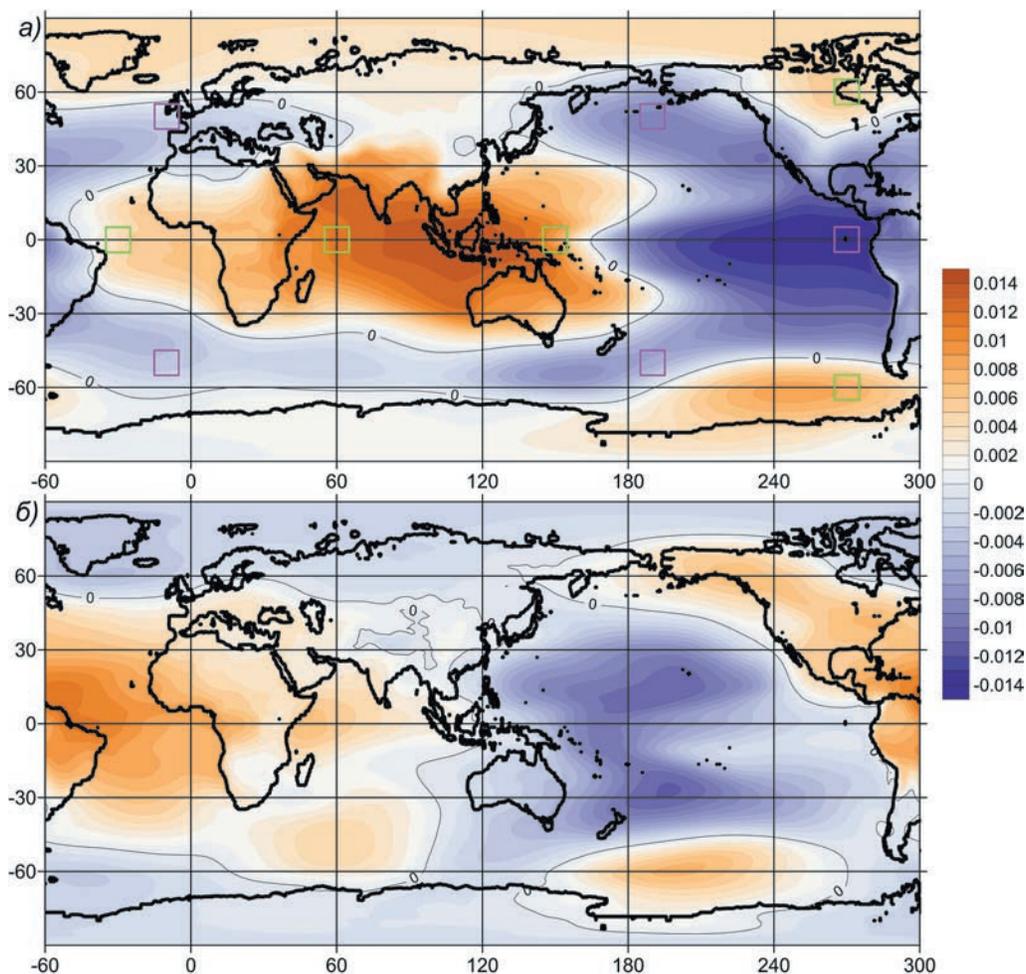


Рис. 2. Средние первая (*a*) и вторая (*b*) главные компоненты межгодовой изменчивости аномалий давления на уровне моря (ДУМ) по 58 (*a*) и 23 (*b*) моделям CMIP6 (эксперимент Historical). Зелеными и фиолетовыми квадратами выделены регионы, по которым вычисляется GAO1.

Fig. 2. Average 1st (*a*) and 2nd (*b*) principal components of interannual variability of sea level pressure (SLP) anomalies for 58 (*a*) and 23 (*b*) CMIP6 models (Historical experiment). Green and purple squares highlight the regions for which GAO1 is calculated.

планетарной структуре ГАО ДУМ. Относительную степень этого соответствия для каждой из исследуемых моделей в отдельности можно оценить по максимальным величинам кросс-корреляций между EOF1 ДУМ и GAO1, и сдвигам, при которых эти максимальные кросс-корреляции достигаются (табл. 1).

Следует учесть, что перед нахождением главных компонент к временным рядам аномалий ПТВ и ДУМ для каждого узла сетки в отдельности применялась полосовая фильтрация от двух до семи лет. Благодаря этой предварительной полосовой фильтрации оказались подавлены практически все флуктуации, не относящиеся к межгодовой изменчивости. Однако использование полосовой фильтрации существенно исказило исходные аномалии ПТВ и ДУМ, а также, соответственно, и результаты РСА. Полученные главные компоненты относятся только к межгодовой изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ, а не к данным ПТВ и ДУМ в целом. Тем не менее, без применения указанной полосовой фильтрации не удалось бы добиться того, чтобы для каждой из исследуемых моделей первая главная компонента аномалий ПТВ и ДУМ соответствовала именно самому сильному сигналу межгодовой климатической изменчивости, которым является ЭНЮК, поэтому частично именно благодаря примененной фильтрации первые главные компоненты аномалий ПТВ и ДУМ исследуемых моделей СМIP6 соответствуют ЭНЮК и ГАО. И при их усреднении получаются среднемоделные поля PC1 ПТВ и PC1 ДУМ (рис. 1 *a* и 2 *a*), повторяющие во многих деталях планетарные структуры ГАО, полученные в [42] с помощью композиционного метода. Из-за особенностей алгоритма разложения на главные компоненты они в случае необходимости брались с противоположным знаком.

Табл. 1 содержит максимальные для сдвигов от -60 до $+60$ мес. значения взаимных корреляций EOF1 глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ (EOF1 ПТВ) и индекса ONI, а также сдвиги, которым эти значения соответствуют. Высокие значения кросс-корреляций EOF1 ПТВ и ONI (около 0,8) подтверждают то, что первые главные компоненты глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ исследуемых моделей СМIP6 относятся именно к ЭНЮК. При этом наблюдаются небольшие запаздывания (1—3 месяца) EOF1 ПТВ по отношению к ONI, что свидетельствует о том, что планетарная пространственная структура PC1 ПТВ (рис. 1 *a*) связана с откликом на события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, вызванные глобальными дальними связями ЭНЮК, объединенными в ГАО. При этом следует учесть, что при нулевом сдвиге корреляция EOF1 ПТВ и индекса ONI несущественно отличается от приведенной в табл. 1 максимальной корреляции. При анализе значений кросс-корреляций табл. 1 следует принять во внимание полосовую фильтрацию от двух до семи лет, предварительно примененную к аномалиям ПТВ, по которым затем вычислялись EOF1. Из-за применения данной фильтрации значения корреляций оказались завышены, а корреляционные функции — сглажены, и скорее позволяют относительно оценить для каждой модели степень связи между EOF1 ПТВ и ONI в сравнении с другими исследуемыми моделями СМIP6, чем определить вклад ЭНЮК в EOF1 ПТВ.

В табл. 1 приведены максимальные для сдвигов от -60 до $+60$ месяцев значения взаимных корреляций EOF1 глобальной межгодовой изменчивости аномалий

ДУМ (EOF1 ДУМ) и индекса GAO1, а также сдвиги, которым эти значения соответствуют. Межмодельный разброс значений кросс-корреляций EOF1 ДУМ и GAO1 выше, чем для EOF1 ПТВ и ONI, что свидетельствует о том, что модели CMIP6 воспроизводят планетарную пространственную структуру ГАО, по которой вычисляется индекс GAO1, хуже, чем аномалии ПТВ в характерном для ЭНЮК экваториальном районе центрально-восточной части Тихого океана. При этом следует учесть более высокую зашумленность GAO1 по сравнению с ONI. Последний вычисляется как аномалии ПТВ над экватором Тихого океана. Из-за этого ONI во многом определяет ТПО в данном районе, которая обладает существенно более высокой инерцией по сравнению с такой атмосферной характеристикой как ДУМ. Однако сдвиги, при которых наблюдаются максимальные корреляции между EOF1 ДУМ и GAO1, равняются 0 для большинства исследуемых моделей CMIP6, что говорит о квазисинхронности EOF1 ДУМ и GAO1.

Таким образом, полученные среднемодельные планетарные пространственные структуры первых главных компонент глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ соответствуют с небольшим запаздыванием (1—3 месяца) максимальной фазе развития событий Эль-Ниньо и квазисинхронны с положительной фазой ГАО. Соответствие среднемодельных PC1 ПТВ и PC1 ДУМ именно положительным фазам ЭНЮК и ГАО объясняется тем, что в случае необходимости для некоторых моделей главные компоненты брались с противоположным знаком. Полосовая фильтрация применялась только к аномалиям ПТВ и ДУМ перед вычислением главных компонент, а не к индексам ONI и GAO1. Благодаря этому высокие значения максимальных кросс-корреляций при небольших сдвигах (табл. 1) подтверждают, что ЭНЮК и ГАО являются первыми главными компонентами глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ.

Для оценки возможности прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья исследуемыми моделями CMIP6 важное значение имеют средне-модельные вторые главные компоненты (PC2 — пространственные структуры EOF2) глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ (PC2 ПТВ) (рис. 1 б) и ДУМ (PC2 ДУМ) (рис. 2 б). Они важны, поскольку те модели, в которых PC2 ПТВ и PC2 ДУМ являются фазами ГАО, опережающими события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, потенциально могут иметь более высокую способность прогнозировать эти события на основе западно-восточного распространения планетарной структуры ГАО. Вклад EOF2 в дисперсию находится в диапазоне 9—23% (табл. 1, столбцы 5 и 7). PC2 ПТВ и PC2 ДУМ строились аналогично первым компонентам, но при этом усреднялись вторые главные компоненты части исследуемых моделей CMIP6. Модели для этого подмножества выбирались следующим образом. Вычислялись значения кросс-корреляций между P_{GAO} (индексом-предиктором ЭНЮК) и EOF2 по аномалиям ПТВ и ДУМ (табл. 2, столбцы 10 и 11). Если величины этих корреляций анализируемой модели имеют статистическую значимость менее $\alpha = 0,05$, то эта модель включалась в ансамбль для усреднения двух главных компонент (табл. 2, столбец 12). Причина выбора такого критерия заключается в том, что далеко не все из исследуемых моделей CMIP6 имеют вторую главную компоненту глобальных межгодовых колебаний аномалий ПТВ и ДУМ, связанную с ГАО и опережающую

по фазе события Эль-Ниньо. Благодаря критерию наличия значимой связи EOF2 с PGO и опережению PGO индексов ONI и GAO1 были выбраны те модели CMIP6, вторая главная компонента которых соответствует фазе ГАО, предшествующей событиям Эль-Ниньо. При этом для опережения индексом PGO именно положительной фазы ЭНЮК в случае необходимости главные компоненты у некоторых моделей брались с противоположным знаком.

Таблица 2

Кросс-корреляции первой и второй эмпирических ортогональных функций аномалий ПТВ и ДУМ между собой, а также с PGO (CMIP6 Historical)

Cross-correlations of the 1st and 2nd empirical orthogonal functions of the SAT and SLP anomalies with each other, as well as with PGO (CMIP6 Historical)

Название модели	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Корр. EOF2 ПТВ и PGO	Корр. EOF2 ДУМ и PGO	Включена ли модель в подсчет РС2
TaiESM1	0,91	1	0,78	1	0,67	8	0,54	7	0,65	0,85	да
AWI-CM-1-1-MR	0,74	1	0,12	15	0,50	5	0,45	0	0,51	0,02	нет
AWI-ESM-1-1-LR	0,57	1	0,25	0	0,45	5	0,59	0	0,36	0,07	нет
BCC-CSM2-MR	0,74	1	0,54	0	0,14	-38	0,47	0	0,04	0,05	нет
BCC-ESM1	0,71	1	0,49	1	0,20	-8	0,58	0	0,35	0,06	нет
CAMS-CSM1-0	0,71	1	0,08	9	0,46	-10	0,37	0	0,14	0,05	нет
CAS-ESM2-0	0,72	1	0,21	-1	0,49	6	0,67	0	0,64	0,15	нет
FGOALS-f3-L	0,79	1	0,35	0	0,70	7	0,32	0	0,36	0,18	да
FGOALS-g3	0,81	1	0,12	29	0,59	-11	0,36	0	0,31	0,21	да
CanESM5	0,62	1	0,42	0	0,38	-15	0,63	0	0,24	0,06	нет
CanESM5-CanOE	0,64	3	0,14	2	0,48	-15	0,20	0	0,58	0,10	нет
ITM-ESM	0,66	2	0,55	1	0,42	7	0,38	-5	0,49	0,67	да
CMCC-CM2-SR5	0,84	1	0,17	-10	0,54	11	0,33	0	0,63	0,09	нет
CMCC-ESM2	0,85	1	0,53	2	0,56	10	0,36	14	0,43	0,79	да
CNRM-CM6-1	0,79	2	0,42	0	0,49	-10	0,16	5	0,20	0,06	нет
CNRM-CM6-1-HR	0,33	0	0,45	0	0,42	-10	0,74	0	0,30	0,09	нет
CNRM-ESM2-1	0,77	1	0,08	-20	0,47	-10	0,35	0	0,37	0,03	нет
ACCESS-CM2	0,74	1	0,58	1	0,47	-8	0,47	0	0,42	0,49	да
ACCESS-ESM1-5	0,76	1	0,37	0	0,57	-12	0,27	0	0,26	0,13	нет
E3SM-1-0	0,82	1	0,32	0	0,40	7	0,16	4	0,58	0,34	да
E3SM-1-1	0,80	1	0,12	-3	0,51	6	0,33	0	0,61	0,19	да
E3SM-1-1-ECA	0,82	1	0,16	1	0,50	6	0,21	0	0,59	0,04	нет
EC-Earth3	0,74	1	0,16	1	0,32	-11	0,26	0	0,47	0,12	нет
EC-Earth3-AerChem	0,66	1	0,31	0	0,44	-8	0,13	35	0,44	0,08	нет

Название модели	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Корр. EOF2 ПТВ и PGAO	Корр. EOF2 ДУМ и PGAO	Включена ли модель в подсчет PC2
EC-Earth3-Veg	0,76	1	0,18	1	0,43	-10	0,15	33	0,42	0,13	нет
FIO-ESM-2-0	0,80	1	0,60	1	0,52	9	0,35	-1	0,63	0,73	да
MPI-ESM-1-2-HAM	0,70	1	0,18	0	0,48	9	0,64	0	0,34	0,15	нет
INM-CM4-8	0,15	17	0,47	1	0,31	-17	0,47	0	0,56	0,40	да
INM-CM5-0	0,45	1	0,19	0	0,27	-12	0,25	0	0,47	0,10	нет
IPSL-CM6A-LR	0,68	2	0,33	0	0,47	-14	0,20	0	0,21	0,08	нет
KIOST-ESM	0,74	2	0,34	0	0,52	-11	0,30	0	0,13	0,02	нет
MIROC-ES2L	0,88	3	0,41	3	0,73	11	0,28	16	0,41	0,34	да
MIROC6	0,85	4	0,19	10	0,64	10	0,15	-13	0,41	0,21	да
HadGEM3-GC31-LL	0,74	1	0,10	-46	0,37	-12	0,34	0	0,47	0,07	нет
HadGEM3-GC31-MM	0,76	1	0,54	1	0,45	7	0,28	7	0,55	0,60	да
UKESM1-0-LL	0,81	1	0,14	-2	0,50	-11	0,40	0	0,70	0,06	нет
UKESM1-1-LL	0,81	1	0,17	-13	0,49	7	0,40	0	0,60	0,02	нет
MPI-ESM1-2-HR	0,71	1	0,27	0	0,40	10	0,65	0	0,41	0,12	нет
MPI-ESM1-2-LR	0,78	1	0,15	2	0,48	-15	0,11	0	0,25	0,20	да
MRI-ESM2-0	0,85	1	0,09	10	0,49	7	0,38	0	0,56	0,05	нет
GISS-E2-1-G	0,85	2	0,67	1	0,69	9	0,46	8	0,08	0,59	нет
GISS-E2-1-G-CC	0,82	2	0,65	1	0,65	-15	0,39	6	0,03	0,51	нет
GISS-E2-1-H	0,79	1	0,56	1	0,62	8	0,34	0	0,27	0,41	да
GISS-E2-2-H	0,56	2	0,15	1	0,48	-11	0,65	0	0,49	0,04	нет
CESM2	0,88	1	0,56	1	0,62	7	0,37	10	0,59	0,76	да
CESM2-FV2	0,90	1	0,77	1	0,72	7	0,55	8	0,56	0,80	да
CESM2-WACCM	0,88	1	0,22	3	0,46	7	0,22	0	0,47	0,34	да
CESM2-WACCM-FV2	0,92	1	0,69	1	0,69	7	0,49	8	0,48	0,76	да
NorCPM1	0,85	1	0,10	1	0,59	8	0,41	0	0,52	0,10	нет
NorESM2-LM	0,86	1	0,30	1	0,65	7	0,23	0	0,35	0,42	да
NorESM2-MM	0,86	1	0,26	14	0,68	6	0,28	17	0,26	0,49	да
KACE-1-0-G	0,78	1	0,12	4	0,53	6	0,57	0	0,68	0,14	нет
GFDL-CM4	0,77	1	0,18	0	0,40	-9	0,17	1	0,64	0,22	да
GFDL-ESM4	0,82	1	0,29	0	0,40	-15	0,16	1	0,30	0,11	нет
NESM3	0,79	1	0,30	1	0,30	-11	0,18	0	0,31	0,14	нет
SAM0-UNICON	0,87	1	0,40	1	0,52	8	0,29	12	0,68	0,56	да
CIESM	0,85	1	0,13	1	0,56	-11	0,21	0	0,54	0,07	нет
MCM-UA-1-0	0,77	1	0,07	-53	0,38	-21	0,06	25	0,48	0,11	нет

Среднемоделные PC2 ПТВ (рис. 1 б) и PC2 ДУМ (рис. 2 б) демонстрируют пространственные структуры, которые соответствуют начальной фазе формирования событий Эль-Ниньо. Основным отличием PC2 ПТВ от PC1 ПТВ является наличие отрицательных значений в тропиках Атлантического и Индийского океанов. Именно над этими отрицательными аномалиями ТПО, согласно [33], в начале событий Эль-Ниньо формируется обширная область положительных аномалий ДУМ, являющаяся частью ГАО. При этом в центральной и восточной частях экваториальной области Тихого океана уже начинает формироваться свойственная для Эль-Ниньо структура («язык») положительных аномалий ПТВ. На поле PC2 ПТВ в высоких широтах Тихого океана, так же как на поле PC1 ПТВ, наблюдаются положительные аномалии ПТВ, но на поле PC2 ПТВ они расположены западнее, чем на поле PC1 ПТВ. Это свидетельствует о западно-восточном распространении пространственной структуры ГАО. Структура PC2 ДУМ также расположена западнее структуры PC1 ДУМ, что подтверждает западно-восточную динамику ГАО. Таким образом, ГАО выступает на межгодовых масштабах в качестве своего рода планетарной атмосферной волны, распространяющейся с запада на восток и включающей ЭНЮК в качестве одного из своих элементов. Благодаря этому западно-восточному распространению ГАО и существует возможность заблаговременного прогнозирования событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

В табл. 2 представлены абсолютные значения максимальных по модулю взаимных корреляций первой и второй эмпирических ортогональных функций (EOF1 и EOF2) межгодовых колебаний глобальных аномалий ПТВ и ДУМ. Дополнительно приведены сдвиги, соответствующие этим максимальным значениям. Корреляции между EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ за некоторым исключением оказались достаточно высокими (около 0,7—0,9) с небольшими сдвигами по фазе (1—2 месяца) (табл. 2, столбцы 2 и 3). Это свидетельствует о сильных связях между первыми главными компонентами аномалий ПТВ и ДУМ, и небольшим опережении EOF1 ДУМ по отношению к EOF1 ПТВ. Поскольку ПТВ над водной поверхностью сильно зависит от ТПО, обладающей достаточно высокой инерционностью, а ДУМ — это атмосферная характеристика, то опережение EOF1 ДУМ по отношению к EOF1 ПТВ свидетельствует о ведущей роли атмосферы по отношению к океану на межгодовых временных масштабах. При этом есть основания полагать, что чем выше корреляции между EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ, тем сильнее и устойчивее у рассматриваемой модели СМIP6 глобальные дальние связи между атмосферой и океаном на межгодовых периодах, свойственных для ЭНЮК и ГАО.

Значения кросс-корреляций между EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (табл. 2, столбцы 4 и 5) демонстрируют гораздо больший межмодельный разброс, чем между EOF1. Существуют модели, у которых корреляции между EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ выше 0,5, что говорит о наличии достаточно сильной связи. Но при этом также есть модели, у которых корреляции между EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ близки к 0, что свидетельствует об отсутствии существенных связей между ними в этих моделях. Таким образом, первые главные компоненты межгодовых колебаний глобальных аномалий ПТВ и ДУМ оказались достаточно сильно связаны между

собой практически у всех исследуемых моделей СМIP6, а вторые — у существенно меньшего числа моделей СМIP6.

Поскольку ЭНЮК — это процесс взаимодействия атмосферы и океана, а индекс-предиктор PGAO зависит и от аномалий ПТВ и от аномалий ДУМ, то для прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья на основе ГАО лучше подходят те модели СМIP6, которые имеют сильные глобальные дальние связи EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ (табл. 2, столбец 2), а также и EOF2 ПТВ с EOF2 ДУМ (таблица 2, столбец 4). Более того, у таких моделей первые главные компоненты глобальных межгодовых колебаний аномалий ПТВ и ДУМ должны иметь сильные связи с ONI и GAO1 (табл. 1), а вторые главные компоненты этих колебаний должны иметь сильные связи с PGAO (табл. 2, столбцы 10 и 11).

Более того, для долгосрочного прогноза ЭНЮК модели должны иметь такие надежные предикторы, с помощью которых возможно прогнозировать сильные события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью примерно равной одному году, то есть позволяющей преодолеть весенний предел предсказуемости. Рассмотрение максимальных кросс-корреляций между EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ (табл. 2, столбец 6), а также сдвигов, при которых эти корреляции наблюдаются (табл. 2, столбец 7), позволяет заключить, что EOF2 ПТВ некоторых моделей СМIP6 опережает EOF1 ПТВ приблизительно на двенадцать месяцев с величинами корреляций более 0,4. Для этих моделей можно использовать вторую главную компоненту межгодовой изменчивости аномалий ПТВ для прогноза первой главной компоненты, то есть для прогноза ЭНЮК. К EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ это относится в меньшей степени (табл. 2, столбцы 8 и 9). Таким образом, на основе анализа указанных в табл. 1 и табл. 2 кросс-корреляций из исследуемых моделей СМIP6, можно выделить те, которые способны прогнозировать ЭНЮК на основе ГАО.

Чтобы определить пространственные структуры аномалий ПТВ и ДУМ, возникающие до событий Эль-Ниньо, которые можно использовать для прогноза ЭНЮК с разной заблаговременностью, для исследуемых моделей СМIP6 вычислены средние композиционные поля аномалий ПТВ (рис. 3) и ДУМ (рис. 4) со сдвигами -14, -12, -10, -8, -6, -4, -2 и 0 месяцев от момента максимального развития событий Эль-Ниньо. Эти поля демонстрируют свойственное для ГАО западно-восточное распространение планетарных структур аномалий ПТВ и ДУМ [42]. Благодаря западно-восточному распространению с помощью индекса-предиктора PGAO, который описывает структуры аномалий ПТВ и ДУМ, возникающие приблизительно за двенадцать месяцев до кульминации Эль-Ниньо (рис. 3 б и рис. 4 б), можно прогнозировать ЭНЮК примерно с годовой заблаговременностью [41]. Приблизительно за год до этого в умеренных и высоких широтах уже формируются соответствующие аномалии ПТВ и ДУМ (рис. 3 а—в и рис. 4 а—в), но расположены они западнее, чем при Эль-Ниньо. Затем эти аномалии смещаются на восток, что совпадает с началом и развитием самого события. Также важную роль играют аномалии ПТВ и ДУМ в тропиках Атлантического и Индийского океанов — в них аномалии ПТВ и ДУМ, характерные для начала Эль-Ниньо, формируются примерно за год до этих событий.

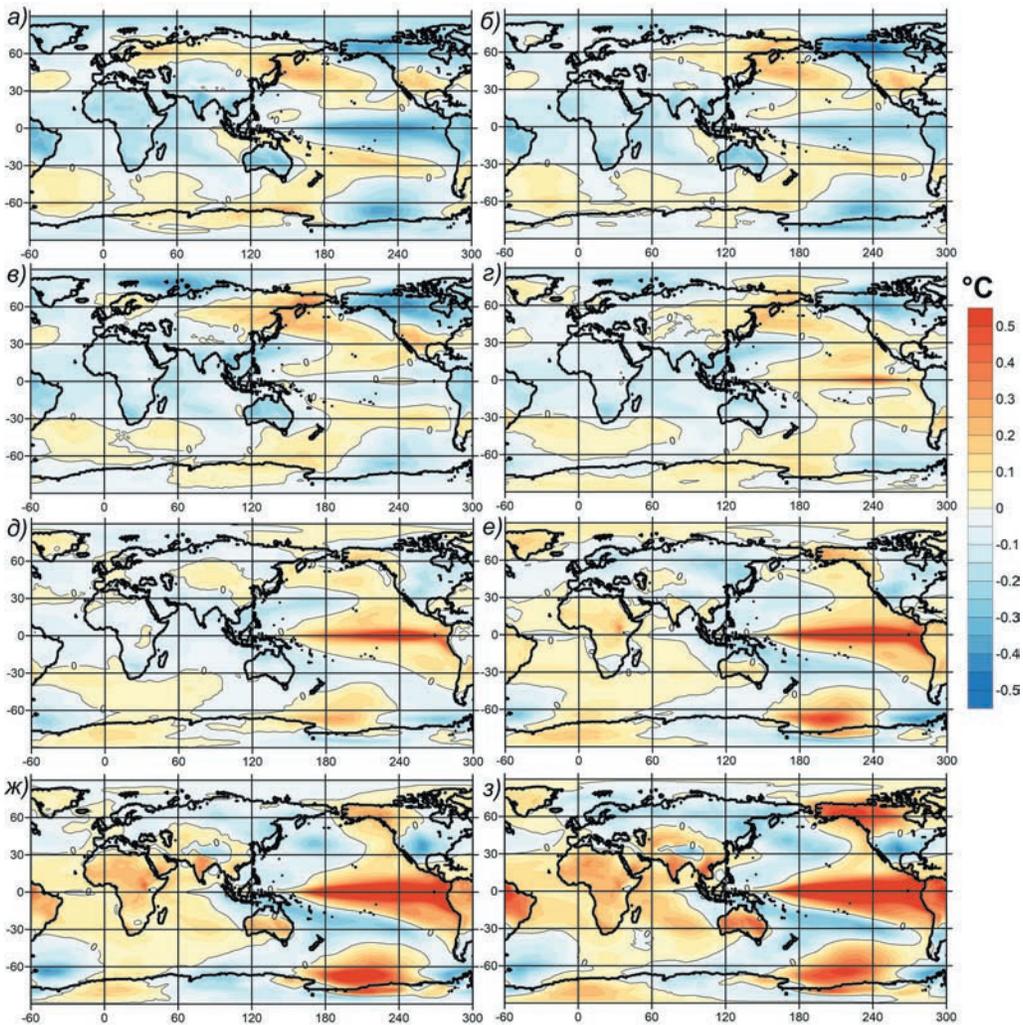


Рис. 3. Средние композиционные поля аномалий ПТВ со сдвигами -14 (а), -12 (б), -10 (в), -8 (г), -6 (д), -4 (е), -2 (ж) и 0 (з) месяцев от максимального развития событий Эль-Ниньо по 58 моделям СМIP6 (эксперимент Historical).

Fig. 3. Average compositional fields of SAT anomalies with shifts -14 (a), -12 (b), -10 (c), -8 (d), -6 (e), -4 (f), -2 (g) and 0 (h) months from maximum of El Niño events for 58 CMIP6 models (Historical experiment).

На рис. 5 представлены средние композиционные поля аномалий ПТВ и ДУМ по индексу P_{GAO} для исследуемых моделей СМIP6. Эти пространственные структуры характерны для фазы ГАО, опережающей приблизительно на двенадцать месяцев максимум событий Эль-Ниньо. Зеленым и фиолетовым цветом на рис. 5 выделены районы, в которых средние аномалии в ПТВ и ДУМ участвуют

в вычислении РГАО с положительным и отрицательным знаком соответственно. Видно, что отмеченные на рис. 5 районы покрывают существенную часть поверхности Земли. Также можно отметить высокую идентичность поля РС2 ПТВ (рис. 1 б) с композиционным полем аномалий ПТВ опережающих максимум

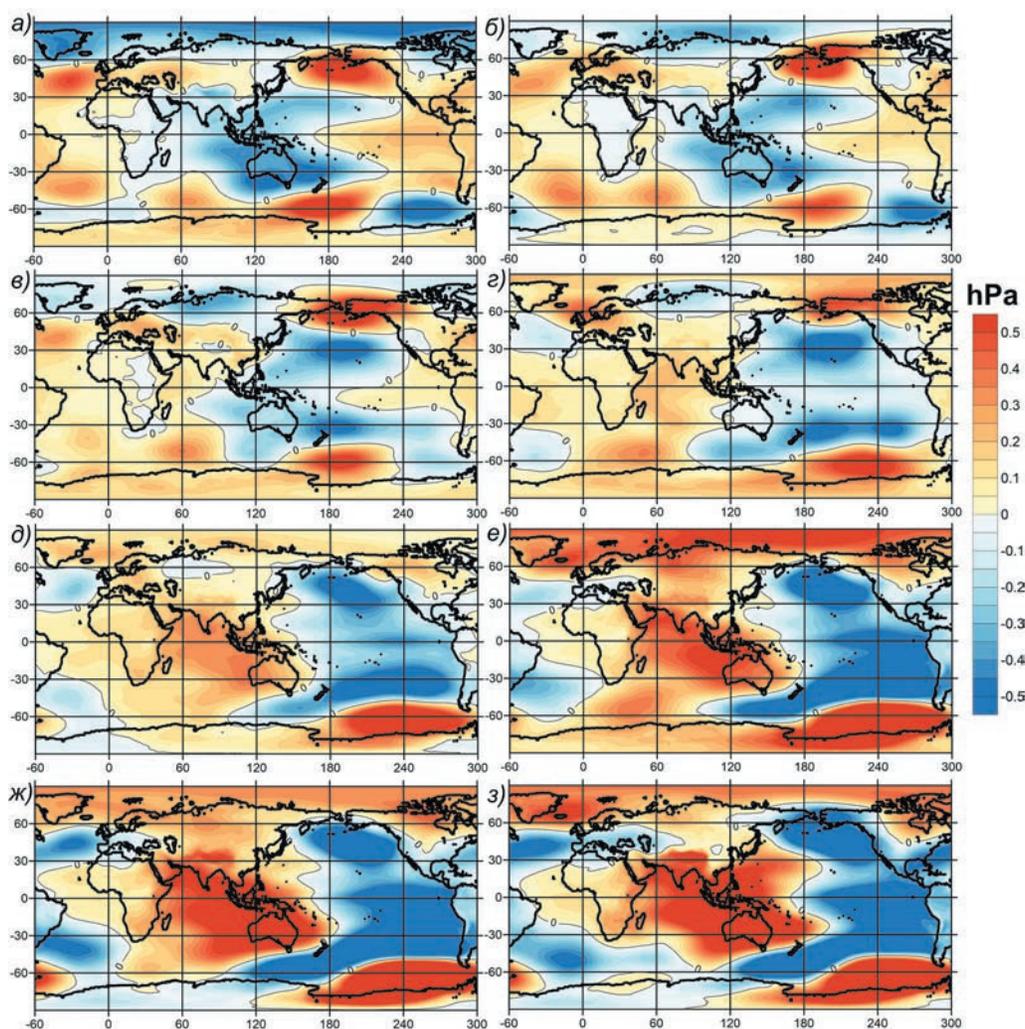


Рис. 4. Средние композиционные поля аномалий ДУМ со сдвигами -14 (а), -12 (б), -10 (в), -8 (г), -6 (д), -4 (е), -2 (ж) и 0 (з) месяцев от максимального развития событий Эль-Ниньо по 58 моделям CMIP6 (эксперимент Historical).

Fig. 4. Average compositional fields of SLP anomalies with shifts -14 (a), -12 (b), -10 (c), -8 (d), -6 (e), -4 (f), -2 (g) and 0 (h) months from maximum of El Niño events for 58 CMIP6 models (Historical experiment).

Эль-Ниньо на 6 месяцев (рис. 3 д), а поля PC2 ДУМ (рис. 2 б) с композиционным полем аномалий ДУМ по индексу PGAO (рис. 5 б). Таким образом, PC2 ДУМ опережает максимумы событий Эль-Ниньо сильнее, чем PC2 ПТВ, что свидетельствует о ведущей роли атмосферы в этом процессе.

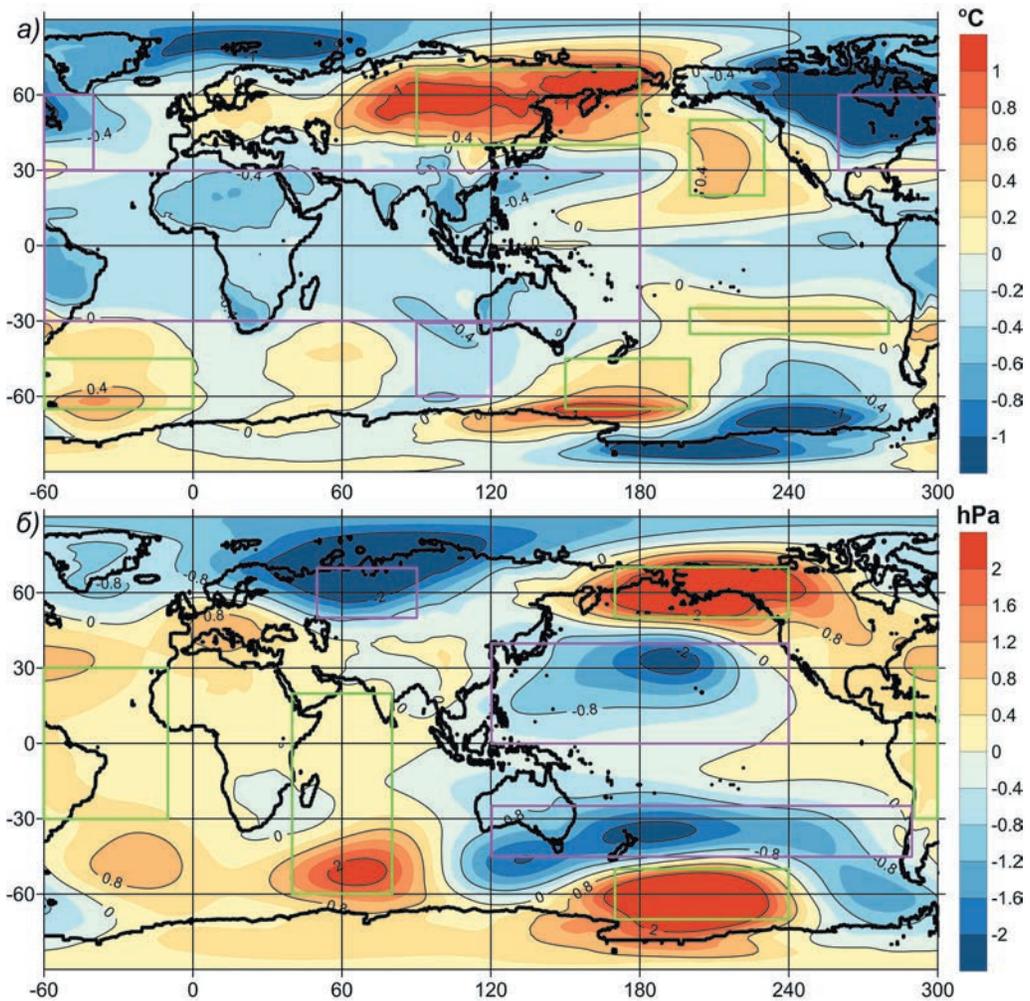


Рис. 5. Средние композиционные поля аномалий ПТВ (а) и ДУМ (б) по индексу PGAO и опережающие приблизительно на 12 месяцев максимум событий Эль-Ниньо по 58 моделям CMIP6 (эксперимент Historical). Зеленым и фиолетовым цветом выделены районы, по которым вычисляется PGAO.

Fig. 5. Average compositional fields of SAT (a) and SLP (b) anomalies by PGAO index and leading by approximately 12 months to the maximum of El Niño events according to 58 CMIP6 models (Historical experiment). The regions for which PGAO is calculated are highlighted in green and purple.

В PGAO входят аномалии как ПТВ, так и ДУМ, поэтому для оценки связей вторых главных компонент с PGAO вычислены максимальные значения кросс-корреляций между суммой модулей EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (комбинированный EOF2) с PGAO (табл. 3, столбец 2) и сдвиги, которым они соответствуют (табл. 3, столбец 3). Видно, что в основном для отмеченных жирным шрифтом в столбце 1 табл. 3 моделей характерны довольно высокие значения этих корреляций при близком к нулю сдвиге.

Таблица 3

Взаимный спектральный и корреляционный анализ ONI, PGAO и комбинированными для ПТВ и ДУМ их EOF1 и EOF2 (CMIP6 Historical)

Cross spectral and correlation analysis of the ONI, PGAO indices and their EOF1 and EOF2 combined for SAT and SLP (CMIP6 Historical)

Название модели	Макс. корреляция EOF2 и PGAO	Сдвиг EOF2 и PGAO (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и EOF1	Сдвиг EOF2 и EOF1 (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и ONI	Сдвиг EOF2 и ONI (месяцы)	Макс. корреляция PGAO и ONI фильтр от 2 до 7 лет	Сдвиг PGAO и ONI (месяцы)	Когерентность PGAO и ONI периоды от 2 до 7 лет	Фазовые соотношения PGAO и ONI (градусы)
TaiESM1	0,82	1	0,67	-8	0,73	-6	0,84	-11	0,82	-117,3
AWI-CM-1-1-MR	0,35	0	0,37	-6	0,40	-2	0,51	-8	0,72	-29,0
AWI-ESM-1-1-LR	0,36	2	0,66	0	0,52	-2	0,38	-8	0,64	-28,9
BCC-CSM2-MR	-0,11	3	-0,24	0	-0,13	27	0,32	-7	0,73	-33,4
BCC-ESM1	0,30	2	0,42	0	0,20	-3	0,41	-6	0,61	-11,5
CAMS-CSM1-0	0,33	8	0,50	-1	0,49	-1	0,68	-11	0,78	-142,6
CAS-ESM2-0	0,55	1	0,58	-1	0,46	-1	0,71	-8	0,79	-62,6
FGOALS-f3-L	0,48	6	0,57	-7	0,62	-5	0,84	-11	0,79	-139,3
FGOALS-g3	0,20	4	0,48	-1	0,56	-3	0,52	-10	0,73	-33,3
CanESM5	0,25	5	0,50	0	0,43	-2	0,36	-10	0,63	-17,7
CanESM5-CanOE	0,47	1	0,44	-1	0,59	-2	0,58	-9	0,74	-49,8
ИТМ-ESM	0,67	0	0,46	-7	0,50	-4	-0,61	7	0,78	-139,0
CMCC-CM2-SR5	0,45	2	0,46	-7	0,55	-4	0,70	-12	0,80	-130,4
CMCC-ESM2	0,71	0	0,54	-12	0,61	-8	0,75	-14	0,77	-136,1
CNRM-CM6-1	0,29	7	0,41	-5	0,47	-2	0,59	-10	0,70	-43,6
CNRM-CM6-1-HR	0,27	2	-0,33	12	0,52	-3	-0,58	8	0,74	-128,8
CNRM-ESM2-1	0,28	4	-0,33	11	0,43	-2	0,66	-9	0,78	-47,4
ACCESS-CM2	0,54	1	-0,42	7	0,53	-5	0,68	-9	0,80	-128,1
ACCESS-ESM1-5	0,23	0	-0,33	12	-0,31	15	0,46	-13	0,68	-152,6
E3SM-1-0	0,57	0	0,37	-5	0,43	-4	0,65	-9	0,82	-51,4
E3SM-1-1	0,55	1	0,53	-4	0,52	-3	0,62	-8	0,76	-53,8
E3SM-1-1-ECA	0,37	0	0,30	-7	0,37	-4	0,66	-9	0,80	-41,9

Продолжение табл. 3

Название модели	Макс. корреляция EOF2 и PGAO	Сдвиг EOF2 и PGAO (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и EOF1	Сдвиг EOF2 и EOF1 (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и ONI	Сдвиг EOF2 и ONI (месяцы)	Макс. корреляция PGAO и ONI филтгр от 2 до 7 лет	Сдвиг PGAO и ONI (месяцы)	Когерентность PGAO и ONI периоды от 2 до 7 лет	Фазовые соотношения PGAO и ONI (градусы)
EC-Earth3	0,39	0	-0,19	15	0,19	-6	0,48	-12	0,75	-128,9
EC-Earth3-AerChem	0,32	0	0,31	-6	0,37	-5	0,57	-9	0,76	-42,6
EC-Earth3-Veg	0,36	0	-0,31	11	0,31	-4	0,61	-12	0,75	-125,7
FIO-ESM-2-0	0,77	0	0,49	-10	0,55	-6	0,74	-10	0,82	-54,3
MPI-ESM-1-2-HAM	0,34	1	0,50	-1	0,45	-3	0,48	-12	0,70	-134,5
INM-CM4-8	0,56	0	-0,22	15	0,46	0	0,14	1	0,65	0,8
INM-CM5-0	0,37	0	-0,17	11	0,14	-5	0,31	-9	0,63	-31,5
IPSL-CM6A-LR	0,21	2	0,46	-1	0,48	-2	0,43	-11	0,66	-23,1
KIOST-ESM	0,30	7	0,41	-4	0,44	-3	-0,72	5	0,70	-143,6
MIROC-ES2L	0,49	1	0,63	-10	0,62	-10	0,81	-17	0,85	-137,8
MIROC6	0,44	1	0,51	-11	0,50	-7	0,76	-15	0,85	-126,7
HadGEM3-GC31-LL	0,39	1	0,41	-1	0,41	-2	0,62	-10	0,76	-50,7
HadGEM3-GC31-MM	0,65	1	0,47	-7	0,55	-5	-0,70	7	0,75	-130,6
UKESM1-0-LL	0,54	1	0,43	-5	0,52	-3	0,69	-9	0,78	-54,9
UKESM1-1-LL	0,49	2	0,48	-3	0,55	-2	0,64	-9	0,75	-133,5
MPI-ESM1-2-HR	0,34	1	0,47	-1	0,47	-5	0,54	-14	0,73	-135,1
MPI-ESM1-2-LR	0,32	1	0,41	-4	0,49	-4	0,51	-14	0,76	-148,0
MRI-ESM2-0	0,38	1	0,36	-7	0,43	-6	0,68	-12	0,79	-119,7
GISS-E2-1-G	-0,47	-12	0,65	-9	0,65	-8	-0,86	6	0,87	-150,6
GISS-E2-1-G-CC	0,41	11	0,60	-8	0,61	-8	-0,86	5	0,87	-145,5
GISS-E2-1-H	0,49	5	0,57	-7	0,65	-6	-0,82	7	0,85	-137,1
GISS-E2-2-H	0,36	0	-0,37	11	0,39	-5	-0,52	10	0,72	-143,8
CESM2	0,77	0	0,56	-8	0,58	-5	-0,72	9	0,82	-117,7
CESM2-FV2	0,75	1	0,69	-8	0,70	-6	0,81	-10	0,81	-46,2
CESM2-WACCM	0,54	0	0,44	-7	0,42	-5	0,68	-11	0,77	-125,8
CESM2-WACCM-FV2	0,71	1	0,67	-7	0,66	-5	0,82	-11	0,79	-130,1
NorCPM1	0,45	1	0,43	-7	0,46	-2	0,73	-9	0,81	-51,2
NorESM2-LM	0,48	0	0,51	-7	0,53	-5	0,81	-12	0,84	-124,8
NorESM2-MM	0,50	0	0,63	-6	0,69	-3	0,72	-12	0,82	-121,9
KACE-1-0-G	0,56	1	0,40	-6	0,52	-4	0,69	-8	0,80	-125,4
GFDL-CM4	0,56	0	0,40	-5	0,48	-4	0,64	-9	0,67	-51,6
GFDL-ESM4	0,28	1	0,32	-5	0,38	-4	0,61	-11	0,78	-34,4
NESM3	0,30	1	0,30	-2	0,35	-3	0,60	-11	0,77	-121,1

Название модели	Макс. корреляция EOF2 и PGAO	Сдвиг EOF2 и PGAO (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и EOF1	Сдвиг EOF2 и EOF1 (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и ONI	Сдвиг EOF2 и ONI (месяцы)	Макс. корреляция PGAO и ONI фильтр от 2 до 7 лет	Сдвиг PGAO и ONI (месяцы)	Когерентность PGAO и ONI периоды от 2 до 7 лет	Фазовые соотношения PGAO и ONI (градусы)
SAM0-UNICON	0,75	0	0,50	-10	0,55	-7	0,72	-10	0,83	-57,1
CIESM	0,39	6	-0,44	15	0,49	-4	0,74	-13	0,86	-125,4
MCM-UA-1-0	0,41	1	-0,25	24	0,20	-6	0,32	-14	0,61	-148,0

Некоторые модели CMIP6 имеют сильные связи между комбинированным EOF1 и EOF2 (табл. 3, столбец 4) при опережении EOF2 более чем на полгода (табл. 3, столбец 5). Также найдены модели CMIP6, которые имеют сильные связи между комбинированным EOF2 и ONI (табл. 3, столбец 6), при опережении EOF2 на несколько месяцев (табл. 3, столбец 7). Но при этом основное значение для заблаговременного прогноза ЭНЮК по ГАО имеет наличие высокой связи между PGAO и ONI (табл. 3, столбец 8) при опережении PGAO приблизительно на один год (табл. 3, столбец 9). Модели CMIP6 с такими связями были дополнительно определены по когерентности между PGAO и ONI (табл. 3, столбец 10) и соответствующим фазовым соотношениям (табл. 3, столбец 11) и отмечены жирным шрифтом в табл. 3, столбец 1.

Все вышеперечисленные относительные оценки связей позволили в итоге выбрать следующие модели CMIP6, с помощью которых можно успешно прогнозировать ЭНЮК по ГАО с заблаговременностью около одного года: TaiESM1, CAMS-CSM1-0, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, FIO-ESM-2-0, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL, MRI-ESM2-0, CESM2-FV2, NorESM2-LM, GFDL-ESM4, NESM3, SAM0-UNICON, CIESM. Графики кросс-корреляционных функций со сдвигами от -60 до +60 месяцев индексов ONI и PGAO для этих моделей и средней для 58 моделей CMIP6 представлены на рис. 6. Эти графики позволяют утверждать, что PGAO опережает ONI приблизительно на один год для большинства моделей CMIP6, но при этом между моделями существует заметная разница в возможности прогноза ЭНЮК по ГАО. Так, значения кросс-корреляций со сдвигом приблизительно -1 год для указанных на рис. 6 моделей выше среднемодельных значений всех исследуемых моделей.

Обращает на себя внимание осцилляторная форма графиков кросс-корреляционных функций, представленных на рис. 6, со средним периодом колебания приблизительно 45 месяцев (3,75 года). Это соответствует найденному в [42] максимуму среднемодельного спектра ONI на периоде приблизительно четыре года. Таким образом, на основе полученных результатов, можно заключить, что ONI, GAO1 и PGAO являются индексами одного и того же планетарного

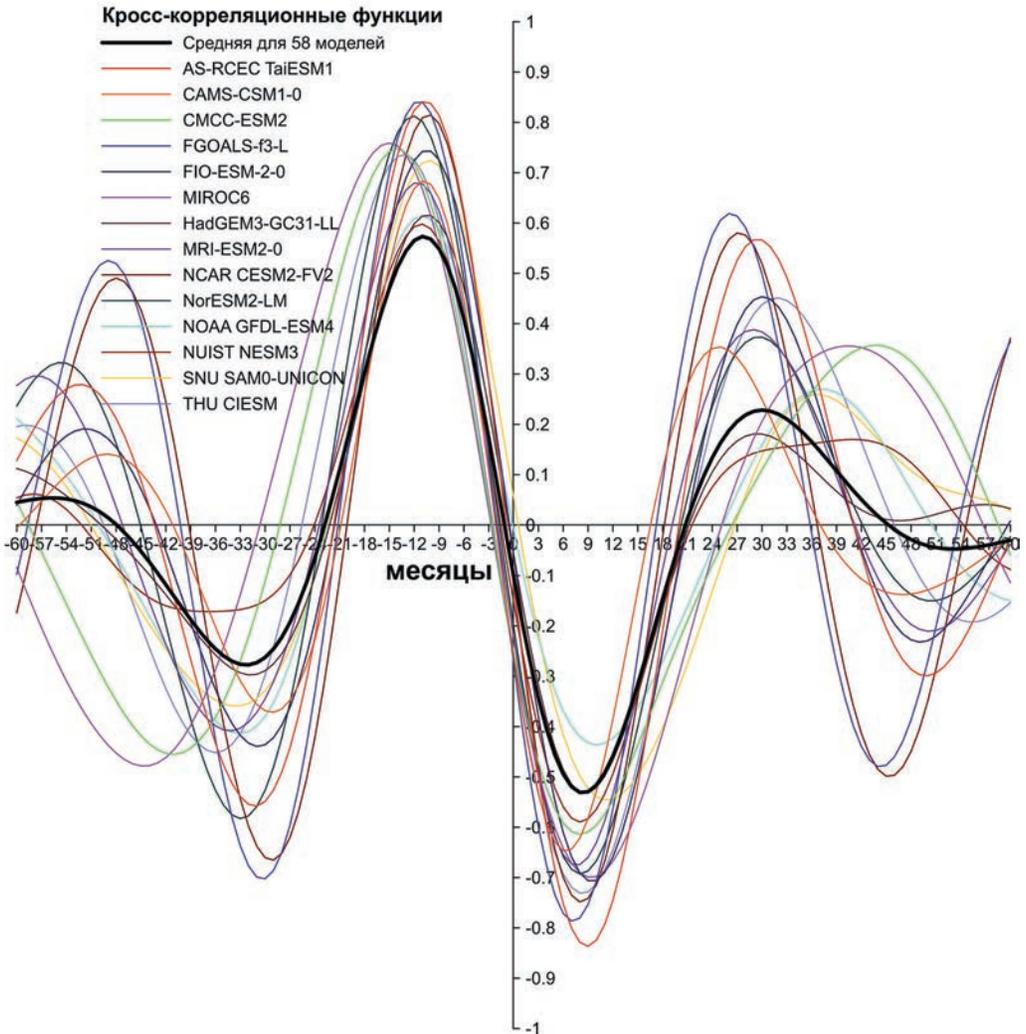


Рис. 6. Кросс-корреляционные функции со сдвигами от -60 до $+60$ месяцев индексов ONI и PGO: средняя для 58 моделей CMIP6 (черный); отдельно для моделей TaiESM1, CAMS-CSM1-0, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, FIO-ESM-2-0, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL, MRI-ESM2-0, CESM2-FV2, NorESM2-LM, GFDL-ESM4, NESM3, SAM0-UNICON, CIESM (эксперимент Historical). PGO опережает ONI при отрицательных сдвигах.

Fig. 6. Cross-correlation functions with shifts from -60 to $+60$ months of the ONI and PGO indices: average for 58 CMIP6 models (black); separately for models TaiESM1, CAMS-CSM1-0, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, FIO-ESM-2-0, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL, MRI-ESM2-0, CESM2-FV2, NorESM2-LM, GFDL-ESM4, NESM3, SAM0-UNICON, CIESM (Historical experiment). PGO outperforms ONI at negative shifts.

процесса, названного в [33] ГАО и включающего ЭНЮК в качестве одного из своих элементов. Причем существенная часть из рассмотренных моделей CMIP6 воспроизводит как саму планетарную структуру ГАО, так и ее западно-восточное распространение, благодаря чему есть возможность прогнозировать ЭНЮК на основе этих моделей с преодолением весеннего предела предсказуемости.

В качестве примера приведены графики ONI и PGOAO за 1900-2014 гг. эксперимента Historical моделей TaiESM1, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, MIROC6, CESM2-FV2 и NorESM2-LM (рис. 7). На этих графиках видно, что практически всюду максимумы PGOAO опережают максимумы ONI (события Эль-Ниньо), а минимумы PGOAO опережают минимумы ONI (события Ла-Нинья). Особенно это опережение характерно для сильных событий. Это позволяет использовать PGOAO в качестве предиктора ЭНЮК в выбранных моделях CMIP6. Тем не менее, наблюдаются периоды, когда события Эль-Ниньо и Ла-Нинья ослабевают, при этом падает и прогностическая способность PGOAO.

Заключение

По результатам моделей CMIP6 построены поля первой и второй главных компонент межгодовой глобальной изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ и исследованы связи между ними. Оказалось, что первые главные компоненты исследуемых моделей связаны с ЭНЮК, а вторые с фазой ГАО, которая на несколько месяцев опережает события Эль-Ниньо. Такое опережение характерно для сильных событий. В тоже время наблюдаются периоды, когда события Эль-Ниньо и Ла-Нинья ослабевают, вследствие чего падает прогностическая способность PGOAO. В связи с этим естественно считать, что PGOAO может использоваться для прогноза локальных экстремумов (максимумов и минимумов) ЭНЮК в выбранных моделях CMIP6 пока что на качественном уровне. Очевидно, для оценки их реальной прогностической эффективности необходимо построение конкретных статистических моделей прогноза ЭНЮК.

Оценены величины связей EOF1 и EOF2 межгодовой глобальной изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ с индексами ЭНЮК и ГАО. Определены модели CMIP6 имеющие сильные связи EOF1 с индексом ЭНЮК ONI и индексом ГАО GAO1. Также найдены те модели CMIP6, комбинированные EOF2 которых имеют сильные связи с индексом-предиктором PGOAO, с помощью которого можно заблаговременно прогнозировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья на основе западно-восточного распространения пространственной структуры ГАО.

На основе анализа выявленных связей между ONI и PGOAO выбраны следующие модели CMIP6, которые позволяют прогнозировать ЭНЮК по ГАО с заблаговременностью приблизительно один год: AS-RCEC TaiESM1, CAMS CAMS-CSM1-0, CMCC CMCC-ESM2, CAS FGOALS-f3-L, FIO-QLNM FIO-ESM-2-0, MIROC MIROC6, MOHC HadGEM3-GC31-LL, MRI MRI-ESM2-0, NCAR CESM2-FV2, NCC NorESM2-LM, NOAA GFDL-ESM4, NUIST NESM3, SNU SAM0-UNICON, THU CIESM.

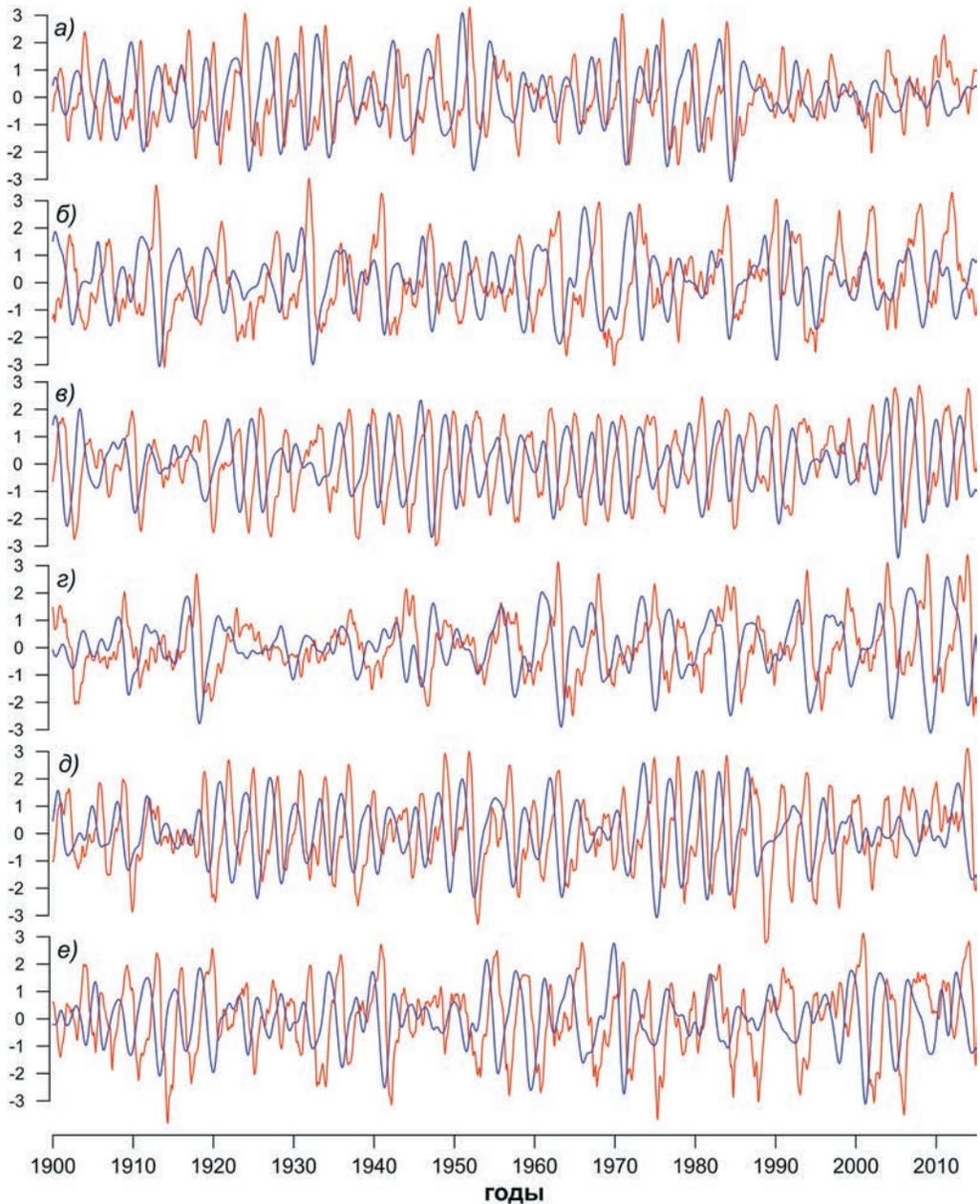


Рис. 7. Сопоставление индексов ONI (красный) и PGO (синий) за 1900—2014 гг. эксперимента Historical моделей CMIP6: TaiESM1 (а), CMCC-ESM2 (б), FGOALS-f3-L (в), MIROC6 (г), CESM2-FV2 (д) и NorESM2-LM (е).

Fig. 7. ONI (red) and PGO (blue) indices for 1900–2014 of the Historical experiment of the CMIP6 models: TaiESM1 (a), CMCC-ESM2 (б), FGOALS-f3-L (в), MIROC6 (г), CESM2-FV2 (д) and NorESM2-LM (е).

Список литературы

1. L'Heureux M. L., Levine A. F. Z., Newman M. et al. ENSO Prediction. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate* (eds M.J. McPhaden, A. Santoso and W. Cai). American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Balmaseda M. A., Davey M. K., Anderson D. L. T. Decadal and Seasonal Dependence of ENSO Prediction Skill // *J. Climate*. 1995. Vol. 8. P. 2705—2715. DOI: 10.1175/1520-0442(1995)008<2705:DAS-DOE>2.0.CO;2.
3. Xue Y., Leetmaa A., Ji M. ENSO Prediction with Markov Models: The Impact of Sea Level // *J. Climate*. 2000. Vol. 13. P. 849—871.
4. Barnston A. G., Tippett M. K., L'Heureux M. L. et al. Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002–11: Is Our Capability Increasing? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. Vol. 93. P. 631—651. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00111.2.
5. Webster P. J., Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1992. Vol. 118. P. 877—926.
6. Torrence C., Webster P. J. The Annual Cycle of Persistence in the El Niño-Southern Oscillation // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1998. Vol. 124. P. 1985—2004.
7. McPhaden M. J. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. 1480. doi: 10.1029/2003GL016872.
8. Duan W., Wei C. The 'spring predictability barrier' for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model // *Int. J. Climatol.* 2013. Vol. 33. P. 1280—1292. DOI: 10.1002/joc.3513.
9. Webster P. J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system // *Meteor. Atmos. Phys.* 1995. Vol. 56. P. 33—55.
10. Latif M., Barnett T. P., Cane M. A. et al. A review of ENSO prediction studies // *Climate Dynamics*. 1994. Vol. 9. P. 167—179.
11. Latif M., Anderson D., Barnett T. et al. A review of the predictability and prediction of ENSO // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103(C7). P. 14375—14393.
12. Tang Y., Zhang R. H., Liu T. et al. Progress in ENSO prediction and predictability study // *National Science Review*. 2018. Vol. 5. P. 826—839. DOI: 10.1093/nsr/nwy105.
13. Железнова И. В., Гущина Д. Ю., Коленникова М. А. Оценка изменения вклада основных предикторов в прогноз Эль-Ниньо в последние десятилетия на основе простой статистической модели // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. Т. 1. С. 42—64. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-1-42-64.
14. Mukhin D., Gavrilov A., Seleznev A., Buyanova M. An atmospheric signal lowering the spring predictability barrier in statistical ENSO forecasts // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. e2020GL091287. DOI:10.1002/essoar.10504537.2.
15. Zheng Y., Chen W., Chen S. Intermodel spread in the impact of the springtime Pacific meridional mode on following-winter ENSO tied to simulation of the ITCZ in CMIP5/CMIP6 // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. e2021GL093945. DOI:10.1002/essoar.10504537.2.
16. Fan H., Yang S., Wang C. et al. Strengthening Amplitude and Impact of the Pacific Meridional Mode on ENSO in the Warming Climate Depicted by CMIP6 Models // *J. Climate*. 2022. Vol. 35. P. 5195—5213. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0683.1.
17. Martín-Rey M., Rodríguez-Fonseca B., Polo I. Atlantic opportunities for ENSO prediction // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 6802—6810.
18. Luo J., Masson S., Behera S. K., Yamagata T. Extended ENSO Predictions Using a Fully Coupled Ocean–Atmosphere Model // *J. Climate*. 2008. Vol. 21. P. 84—93. DOI: 10.1175/2007JCLI1412.1.
19. Tziperman E., Yu L. Quantifying the Dependence of Westerly Wind Bursts on the Large-Scale Tropical Pacific SST // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20 (12). P. 2760—2768. DOI: 10.1175/JCLI4138a.1.
20. IRI ENSO Predictions Plume. Available at: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/> (accessed on: 09.06.2024).
21. Barnston A. G., Tippett M. K., van den Dool H. M., Unger D. A. Toward an Improved Multimodel ENSO Prediction // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2015. Vol. 54. P. 1579—1595. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0188.1.

22. Barnston A. G., Tippett M. K., Ranganathan M. et al. Deterministic skill of ENSO predictions from the North American Multimodel Ensemble // *Clim. Dyn.* 2019. Vol. 53. P. 7215—7234. DOI: 10.1007/s00382-017-3603-3.
23. Kirtman B. P., Min D. Multimodel Ensemble ENSO Prediction with CCSM and CFS // *Mon. Wea. Rev.* 2009. Vol. 137. P. 2908—2930. DOI: 10.1175/2009MWR2672.1.
24. Zhou L., Zhang R. H. A Hybrid Neural Network Model for ENSO Prediction in Combination with Principal Oscillation Pattern Analyses // *Adv. Atmos. Sci.* 2022. Vol. 39. P. 889—902. DOI: 10.1007/s00376-021-1368-4.
25. Лубков А. С., Воскресенская Е. Н., Марчукова О. В. Применение нейронных сетей для прогноза явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов // *Метеорология и гидрология.* 2020. Т. 45. № 11. С. 111—121.
26. Hassanibesheli F., Kurths J., Boers N. Long-term ENSO prediction with echo-state networks // *Environ. Res.: Climate.* 2022. Vol. 1. 011002. DOI:10.1088/2752-5295/ac7f4c.
27. Gavrilov A., Seleznev A., Mukhin D. et al. Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast // *Clim. Dyn.* 2019. Vol. 52. P. 2199—2216. DOI:10.1007/s00382-018-4255-7.
28. Zheng Y., Rugenstein M., Pieper P. et al. El Niño–Southern Oscillation (ENSO) predictability in equilibrated warmer climates // *Earth Syst. Dynam.* 2022. Vol. 13. P. 1611—1623. DOI: 10.5194/esd-13-1611-2022.
29. Beverley J. D., Newman M., Hoell A. Rapid development of systematic ENSO-related seasonal forecast errors // *Geophysical Research Letters.* 2023. Vol. 50. e2022GL102249. DOI: 10.1029/2022GL102249.
30. Kirtman B. P. The COLA Anomaly Coupled Model: Ensemble ENSO Prediction // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 2324—2341. DOI: 10.1175/1520-0493(2003)131<2324:TCACME>2.0.CO;2.
31. Yan J., Mu L., Wang L. et al. Temporal Convolutional Networks for the Advance Prediction of ENSO // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. 8055. DOI: 10.1038/s41598-020-65070-5.
32. Ineson S., Balmaseda M. A., Davey M. K. et al. Predicting El Niño in 2014 and 2015 // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. 10733. DOI: 10.1038/s41598-018-29130-1.
33. 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.
34. 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. DOI: 10.7868/S0030157416020039.
35. Серых И. В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // *Океанологические исследования.* 2018. Т. 46. № 1. С. 14—28. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2.
36. 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. DOI: 10.1007/s00024-019-02182-8.
37. 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.
38. Серых И. В. О роли Эль-Ниньо – Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов. *Гидрометеорология и экология.* 2021. № 63. С. 329—370. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370.
39. 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. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>.
40. Вакуленко Н. В., Серых И. В., Сонечкин Д. М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика.* 2018. Т. 26. № 4. С. 75—94. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>.
41. Serykh I. V., Sonechkin D. M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // *International Journal of Climatology.* 2021. Vol. 41. P. 3781—3792. DOI: 10.1002/joc.6488.

42. 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.
43. 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. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
44. 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. DOI: 10.1007/s00704-018-02761-0.
45. Mukhin D., Gavrilov A., Feigin A. et al. Principal nonlinear dynamical modes of climate variability // *Nature Scientific Reports.* 2015. Vol. 5. 15510. DOI: 10.1038/srep15510

References

1. L'Heureux M. L., Levine A. F. Z., Newman M. et al. ENSO Prediction. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate* (eds M. J. McPhaden, A. Santoso and W. Cai). American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Balmaseda M. A., Davey M. K., Anderson D. L. T. Decadal and Seasonal Dependence of ENSO Prediction Skill. *J. Climate.* 1995;(8): 2705—2715. DOI: 10.1175/1520-0442(1995)008<2705:DAS-DOE>2.0.CO;2.
3. Xue Y., Leetmaa A., Ji M. ENSO Prediction with Markov Models: The Impact of Sea Level. *J. Climate.* 2000;(13): 849—871.
4. Barnston A. G., Tippett M. K., L'Heureux M. L., Li S., DeWitt D. G. Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002–11: Is Our Capability Increasing? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012;(93): 631—651. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00111.2.
5. Webster P. J., Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1992;(118): 877—926.
6. Torrence C., Webster P. J. The Annual Cycle of Persistence in the El Niño-Southern Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1998;(124): 1985—2004.
7. McPhaden M. J. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers. *Geophys. Res. Lett.* 2003;(30): 1480. doi: 10.1029/2003GL016872.
8. Duan W., Wei C. The 'spring predictability barrier' for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model. *Int. J. Climatol.* 2013;(33): 1280—1292. DOI: 10.1002/joc.3513.
9. Webster P. J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. *Meteor. Atmos. Phys.* 1995;(56): 33—55.
10. Latif M., Barnett T. P., Cane M. A. et al. A review of ENSO prediction studies. *Climate Dynamics.* 1994;(9): 167—179.
11. Latif M., Anderson D., Barnett T. et al. A review of the predictability and prediction of ENSO. *J. Geophys. Res.* 1998;(103): 14375—14393.
12. Tang Y., Zhang R. H., Liu T. et al. Progress in ENSO prediction and predictability study. *National Science Review.* 2018;(5): 826—839. DOI: 10.1093/nsr/nwy105.
13. Zheleznova I. V., Gushchina D. Yu., Kolennikova M. A. Evaluation of contribution of major El Niño predictors to its forecasts during the last decades based on a simple statistical model. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology.* 2020;(1): (42—64). (In Russ.). DOI: 10.21513/2410-8758-2020-1-42-64.
14. Mukhin D., Gavrilov A., Seleznev A., Buyanova M. An atmospheric signal lowering the spring predictability barrier in statistical ENSO forecasts. *Geophysical Research Letters.* 2021;(48): e2020GL091287. DOI: 10.1002/essoar.10504537.2.
15. Zheng Y., Chen W., Chen S. Intermodel spread in the impact of the springtime Pacific meridional mode on following-winter ENSO tied to simulation of the ITCZ in CMIP5/CMIP6. *Geophysical Research Letters.* 2021;(48): e2021GL093945. DOI: 10.1002/essoar.10504537.2.
16. Fan H., Yang S., Wang C. et al. Strengthening Amplitude and Impact of the Pacific Meridional Mode on ENSO in the Warming Climate Depicted by CMIP6 Models. *J. Climate.* 2022;(35): 5195—5213. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0683.1.

17. Martín-Rey M., Rodríguez-Fonseca B., Polo I. Atlantic opportunities for ENSO prediction. *Geophys. Res. Lett.* 2015;(42): 6802—6810.
18. Luo J., Masson S., Behera S. K., Yamagata T. Extended ENSO Predictions Using a Fully Coupled Ocean–Atmosphere Model. *J. Climate.* 2008;(21): 84—93. DOI: 10.1175/2007JCLI1412.1.
19. Tziperman E., Yu L. Quantifying the Dependence of Westerly Wind Bursts on the Large-Scale Tropical Pacific SST. *Journal of Climate.* 2007;(20): 2760—2768. DOI: 10.1175/JCLI4138a.1.
20. IRI ENSO Predictions Plume. Available at: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/> (accessed on: 09.06.2024).
21. Barnston A. G., Tippett M. K., van den Dool H. M., Unger D. A. Toward an Improved Multimodel ENSO Prediction. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2015;(54): 1579—1595. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0188.1.
22. Barnston A. G., Tippett M. K., Ranganathan M. et al. Deterministic skill of ENSO predictions from the North American Multimodel Ensemble. *Clim. Dyn.* 2019;(53): 7215—7234. DOI: 10.1007/s00382-017-3603-3.
23. Kirtman B. P., Min D. Multimodel Ensemble ENSO Prediction with CCSM and CFS. *Mon. Wea. Rev.* 2009;(137): 2908—2930. DOI: 10.1175/2009MWR2672.1.
24. Zhou L., Zhang R. H. A Hybrid Neural Network Model for ENSO Prediction in Combination with Principal Oscillation Pattern Analyses. *Adv. Atmos. Sci.* 2022;(39): 889—902. DOI: 10.1007/s00376-021-1368-4.
25. Lubkov A. S., Voskresenskaya E. N., Marchukova O. V. Forecasting El Niño/La Niña and their types using neural networks. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2020;(45): 806—813.
26. Hassanibesheli F., Kurths J., Boers N. Long-term ENSO prediction with echo-state networks. *Environ. Res.: Climate.* 2022;(1): 011002. DOI: 10.1088/2752-5295/ac7f4c.
27. Gavrilov A., Seleznev A., Mukhin D. et al. Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast. *Clim. Dyn.* 2019;(52): 2199—2216. DOI: 10.1007/s00382-018-4255-7.
28. Zheng Y., Rugenstein M., Pieper P. et al. El Niño–Southern Oscillation (ENSO) predictability in equilibrated warmer climates. *Earth Syst. Dynam.* 2022;(13): 1611—1623. DOI: 10.5194/esd-13-1611-2022.
29. Beverley J. D., Newman M., Hoell A. Rapid development of systematic ENSO-related seasonal forecast errors. *Geophysical Research Letters.* 2023;(50): e2022GL102249. DOI: 10.1029/2022GL102249.
30. Kirtman B. P. The COLA Anomaly Coupled Model: Ensemble ENSO Prediction. *Mon. Wea. Rev.* 2003;(131): 2324—2341. DOI: 10.1175/1520-0493(2003)131<2324:TCACME>2.0.CO;2.
31. Yan J., Mu L., Wang L. et al. Temporal Convolutional Networks for the Advance Prediction of ENSO. *Sci. Rep.* 2020;(10): 8055.
32. Ineson S., Balmaseda M. A., Davey M. K. et al. Predicting El Niño in 2014 and 2015. *Sci. Rep.* 2018;(8): 10733. DOI: 10.1038/s41598-018-29130-1.
33. 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).
34. 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). (In Russ.). DOI: 10.7868/S0030157416020039.
35. Serykh I. V. On the dynamics and structure of the Global atmospheric oscillation in climate models and reality. *Okeanologicheskije issledovaniya = Journal of Oceanological Research.* 2018;(46): (14—28). (In Russ.). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2.
36. 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. DOI: 10.1007/s00024-019-02182-8.
37. 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.
38. 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 (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University).* 2021;(63): (329—370). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370.
39. 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.). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>.
40. Vakulenko N. V., Serykh I. V., Sonechkin D. M. Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 3. Predictability of El Niño. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy = Prikladnaya nelineynaya dinamika. Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics.* 2018;(26): (75—94). (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>.
 41. Serykh I. V., Sonechkin D. M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. *International Journal of Climatology.* 2021;(41): 3781—3792. DOI: 10.1002/joc.6488.
 42. 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.
 43. 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. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
 44. 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. DOI: 10.1007/s00704-018-02761-0.
 45. Mukhin D., Gavrilov A., Feigin A. et al. Principal nonlinear dynamical modes of climate variability. *Nature Scientific Reports.* 2015;(5): 15510. DOI: 10.1038/srep15510.

Информация об авторе

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

Information about author

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

Статья поступила 13.06.2024

Принята к печати 16.08.2024

The article was received on 13.06.2024

The article was accepted on 16.08.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 507—523.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):507—523.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.16:627.133.5
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-507-523

Оценка неопределенности гидрометрического учета стока при использовании однозначной кривой расходов воды

Тимур Менирович Аксянов, Татьяна Ивановна Яковлева

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия, oggc@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты оценки неопределенности (погрешности) гидрометрического учета стока при использовании для расчетов ежедневных расходов воды однозначной кривой расходов. Даны рекомендации по выбору оптимальной аппроксимирующей зависимости для кривой расходов, позволяющие получить наиболее узкую полосу неопределенности. Приведены результаты численных экспериментов по оптимизации измерений расходов воды по данным наблюдений 2017 г. гидрологического поста р. Терек — с. Аликазган, которые показывают, что при оптимально подобранной аппроксимации кривой расходов воды количество измеренных расходов воды для ее обоснования может быть сокращено в два или даже три раза без ущерба точности расчета ежедневных расходов воды.

Ключевые слова: измеренные расходы воды, учёт стока, оценка неопределенности, аппроксимация кривой расходов воды.

Для цитирования: Аксянов Т. М., Яковлева Т. И. Оценка неопределенности гидрометеорологического учета стока при использовании однозначной кривой расходов воды // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 507—523. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-507-523.

HYDROLOGY

Original article

Estimation of uncertainty of hydrometric water discharge computation when using a single-valued discharge curve

Timur M. Aksyanov, Tatiana I. Yakovleva

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23

Summary. The article presents the results of estimating the uncertainty (error) of hydrometric water discharge computation (computation of daily and averaged water discharges over a decade, month and year) when using a single-valued discharge curve for computation daily water discharges. The algorithm

developed in the course of research for estimating the boundaries of the uncertainty band of the discharge curve can be used to estimate uncertainties (errors) in computation daily water discharges based on continuous observations of water levels and episodic measurements of water flow. Recommendations are given on the choice of the optimal approximating dependence for the discharge curve, allowing to obtain the narrowest band of uncertainty. The results of numerical experiments on the optimization of measurements of water discharge according to the 2017 observations of the hydrological post riv. Terek — vil. Alikazgan, which show that with an optimally selected approximation of the discharge curve, the number of measured water discharges for its justification can be reduced by two or even three times without compromising the accuracy of computation of daily water discharges. When reducing the initial set of measured water discharge by almost three times, the standard errors in calculating daily and average annual water discharge increased by no more than 1,5 %.

Keywords: measured water discharge, runoff estimation, uncertainty approximation of rating curves.

For citation: Aksyanov T. M., Yakovleva T. I. Estimation of uncertainty of hydrometric water discharge computation when using a single-valued discharge curve. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):507—523. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-507-523.

Введение

В современных условиях особое значение приобретает гидрометрический контроль речного стока в связи с антропогенными изменениями климата и ландшафтно-экологических условий. Объективная оценка погрешностей учета стока — составная часть такого контроля. Между тем в гидрологической литературе существуют противоречивые представления о погрешностях вычисления расходов воды [1—2]. Чаще всего эти погрешности оказываются заниженными из-за недоучета изменений пропускной способности русла в интервале между измерениями расходов воды. Попытка выполнить оценку погрешностей вычисления ежедневных расходов воды (ЕРВ) на статистической основе сделана Г. А. Алексеевым [1]. К сожалению, при получении таких оценок автор опирался на некоторые ошибочные предпосылки.

Во-первых, все выкладки в [1] сделаны для случая вычисления ЕРВ методом линейной интерполяции между измеренными расходами воды (ИРВ), при этом полностью проигнорирован факт наличия связи расходов и уровней воды, во-вторых, для расчета погрешностей интерполяции автокорреляционная функция рассчитывалась по данным ЕРВ, в то время как необходимо было оценивать автокорреляционную связанность по данным измеренных расходов воды. В [1] приведены оценки погрешностей, осредненных за декаду, месяц и сезон характеристик речного стока, которые в трактовке Г. А. Алексеева напрямую зависят от временной корреляционной связанности и коэффициента вариации ежедневных расходов воды. Например, для периода весеннего половодья для гидрологического поста (ГП) р. Сакмара — с. Галеево в [1] получено значительно завышенное значение погрешности среднего месячного расхода воды (при трех ИРВ в месяц) — 41 %.

Позднее приближенные оценки погрешностей ежедневных и осредненных характеристик расходов воды были сделаны в работах [3, 4]. В [3] показано, что наибольшая погрешность расчета максимальных ежедневных расходов воды может превышать среднее квадратическое значение случайной погрешности ИРВ

в 1,8 раза, наименьших — в 14 раз, в среднем диапазоне расходов — быть в пять раз меньше случайной погрешности ИРВ.

В отечественной гидрологической практике до настоящего времени принято оценивать погрешности данных гидрологических наблюдений и гидрометрического учета стока по отклонению результата измерения или расчета от истинного или действительного (условно истинного) значения измеряемой (рассчитанной) величины. Под истинным значением физической величины понимают значение, идеально отражающее в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Из-за несовершенства средств и методов измерений и методов расчета истинные значения величин практически получить нельзя.

В настоящее время общепризнано, что после того, как найдены оценки всех ожидаемых составляющих погрешности и в результате измерения внесены соответствующие поправки, все еще остается некоторая неопределенность в отношении полученного результата, т. е. сомнение в том, насколько точно он соответствует значению измеряемой или рассчитанной величины. По этой причине при оценке точности измерений и расчетов следует использовать вместо понятия «погрешность» понятие «неопределенность».

Неопределенность — это интервал, в котором может с заданной вероятностью находиться действительное значение некоторой величины. Числовое значение неопределенности является произведением истинного стандартного отклонения погрешностей и числового параметра, зависящего от доверительного уровня [5, 6].

Понятие «неопределенности» в измерениях и в оценке гидрологических характеристик как определяемой в количественном отношении характеристики точности измерений является относительно новым в противоположность термину «погрешность», который уже давно используется в гидрологической практике.

С целью достижения международного единства в подходах к определению неопределенностей измерений объединенной рабочей группой экспертов, назначенных Международным бюро мер и весов (МБМВ), Международной организацией по стандартизации (ИСО), Международной электротехнической комиссией (МЭК) и Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ), было разработано «Руководство по выражению неопределенности в измерениях» [7]. В Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2018 г. межгосударственный стандарт ГОСТ 34100.3—2017, идентичный Руководству [7].

На практике существует много возможных источников (ошибок) неопределенности при измерении, которые могут включать исходные ошибки, ошибки в отсчете, ошибки интерполяции, ошибки наблюдения, гистерезис, ошибку, вызванную нелинейностью, ошибку использования прибора за пределами допустимой точности и пр. [8].

Гидрологические характеристики часто вычисляются по нескольким измеренным составляющим, поэтому различают стандартную неопределенность, суммарную неопределенность и расширенную неопределенность.

В настоящей работе мы остановимся на стандартной неопределенности. Стандартная неопределенность соответствует одному стандартному отклонению распределения вероятностей ошибок измерений. При оценке данных расчета расходов воды по зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$ неопределенность расчета необходимо выразить в виде полосы или интервала неопределенности. В последнее десятилетие вопрос оценки неопределенностей расчета расходов воды по кривым расходов привлекает внимание многих авторов [9, 10]. Целью данной статьи является разработка алгоритма расчета границ полосы неопределенности кривой расходов, опирающегося на статистические характеристики аппроксимирующей ее функции.

Оценка неопределенности гидрометрического учета стока на основе однозначных зависимостей расходов от уровней воды

В соответствии с основными положениями методики гидрометрического учета стока, изложенными в [11, 12, 13], в большинстве случаев за основу расчета ежедневных расходов воды принимается кривая расходов воды (КР). В режимном варианте учета стока чаще всего используется годовая КР, построенная по данным измеренных расходов воды расчетного года. При оперативном вычислении расходов воды для каждого исследуемого гидрометрического створа необходимо выбрать опорную КР. В качестве опорной для оперативного учета стока кривой расходов рекомендуется принимать:

— многолетнюю зависимость расходов от уровней воды $Q(H)$ в случаях, когда в течение последних нескольких лет не происходило существенных изменений русла и режима реки;

— уравнение, полученное по данным об ИРВ одного-двух последних лет, если такие изменения прослеживались.

Об изменениях, происходящих в русле реки, можно судить на основе анализа положения годовых кривых расходов на графике $Q(H)$ и хронологических графиков изменения средних и минимальных отметок дна в исследуемом гидрометрическом створе в течение ряда лет.

Для удобства выполнения расчетов и их автоматизации КР необходимо представить в виде аналитического выражения, то есть выполнить аппроксимацию зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$. Уравнение аналитической зависимости расходов от уровней воды может быть получено непосредственно по данным совокупности ИРВ за отдельный год или за многолетие. Аналитическое уравнение может быть получено также по данным (опорным точкам) таблицы координат, выбранной для использования опорной КР.

Аналитическое представление зависимости расходов от уровней $Q(H)$ расширяет возможности по оценке неопределенности получаемых на основе КР данных расчета ежедневных или срочных расходов воды.

Один из основных рекомендуемых способов аналитического представления КР — это предложенная В. Г. Глушковым аналитическая форма аппроксимации КР, имеющая вид:

$$Q(H) = a(H - H_0)^b, \quad (1)$$

где Q — расход воды, м³/с; H — наблюдаемый уровень воды над «нулем» поста, м¹; H_0 — уровень воды над «нулем» поста, при котором расход воды в исследуемом гидростворе равен нулю, м; a и b — параметры уравнения регрессии (УР), определяемые по данным измерений.

Второй рекомендуемый способ аппроксимации — метод полиномиальной регрессии, т. е. получение УР в виде полинома:

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_kH^k, \quad (2)$$

где a_0, \dots, a_k — параметры УР, определяемые по данным измерений.

Наиболее часто подбирается полином второй или третьей степени, редко четвертой. Использование при аппроксимации КР степеней полинома вида (2) выше 4-ой степени приводит, как правило, к плохой обусловленности матрицы (H, H^k) , что многократно увеличивает погрешности расчета параметров УР [14].

Параметры УР вида (1) и (2) определяются с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

В результате аппроксимации рассчитывается УР для линии (поверхности) регрессии, которая получается путем усреднения данных измерения и, в значительной мере, свободна от случайных погрешностей, присущих используемому методу измерения. Однако при этом случайные погрешности не устраняются полностью, а лишь уменьшаются в определенное число раз, поэтому получаемая в результате статистической обработки (как посредством графических построений, способом медиан, так и МНК) зависимость сохраняет некоторую полосу неопределенности, хотя и более узкую (в случае, если она обоснована достаточным количеством измерений), чем полоса рассеяния исходных данных. Ширина полосы неопределенности рассчитывается по формулам, в которые входят такие величины, как дисперсия параметров УР, объем исходной совокупности данных и коэффициенты корреляции независимых переменных, входящих в УР.

При выборе наилучшего (оптимального) уравнения для аппроксимации зависимости расходов от уровней воды выполняется сравнение следующих характеристик качества аппроксимации:

- средних абсолютных (m_q) и средних относительных (m_q) значений отклонений ИРВ от УР линии (поверхности) регрессии;
- среднеквадратических абсолютных (σ_q) и среднеквадратических относительных (σ_q) значений отклонений ИРВ от линии (поверхности) регрессии;
- анализа графиков относительных отклонений ИРВ от уровня воды $\tilde{q}(H)$, пример которого приведен на рис. 1.

В соответствии с рекомендациями [11, 12], в качестве наилучшей (оптимальной) выбирается аппроксимирующая зависимость, имеющая следующие характеристики качества аппроксимации:

¹ Для того, чтобы значения параметров аппроксимирующего КР уравнения были значимыми, при аппроксимации уровни воды принято выражать в м, а не в см над «нулем» поста.

— значения m_q и $m_{\tilde{q}}$ близки к нулю, что свидетельствует об отсутствии систематической составляющей в совокупности отклонений ИРВ от линии (поверхности) регрессии;

— значения σ_q и $\sigma_{\tilde{q}}$ имеют наименьшие значения по сравнению с другими алгоритмами аппроксимации;

— точки на графике $\tilde{q}(H)$ располагаются примерно симметричными полосами сверху и снизу от линии нулевой ординаты ($\tilde{q} = 0$), как показано на рис. 1;

— ширина полосы неопределенности КР должна быть наименьшей.

При близости значений основных характеристик качества аппроксимации, перечисленных выше, наименьшую полосу неопределенности имеет простая линейная регрессия в виде:

$$Q(H) = a_0 + a_1 H. \tag{3}$$

Погрешность аппроксимации линейной модели оказывается наименьшей в точке центра тяжести исходных данных, т. е. в точке (Q_{cp}, H_{cp}) [14] и равна: $\sigma_p / \sqrt{(n-2)}$. По мере удаления от центра тяжести в обе стороны она увеличивается, и в любой произвольной точке t ее дисперсия равна:

$$\sigma_{Q_p(H_t)}^2 = \sigma_p^2 / (n-2) + \sigma_{a_1}^2 (H_t - \bar{H})^2, \tag{4}$$

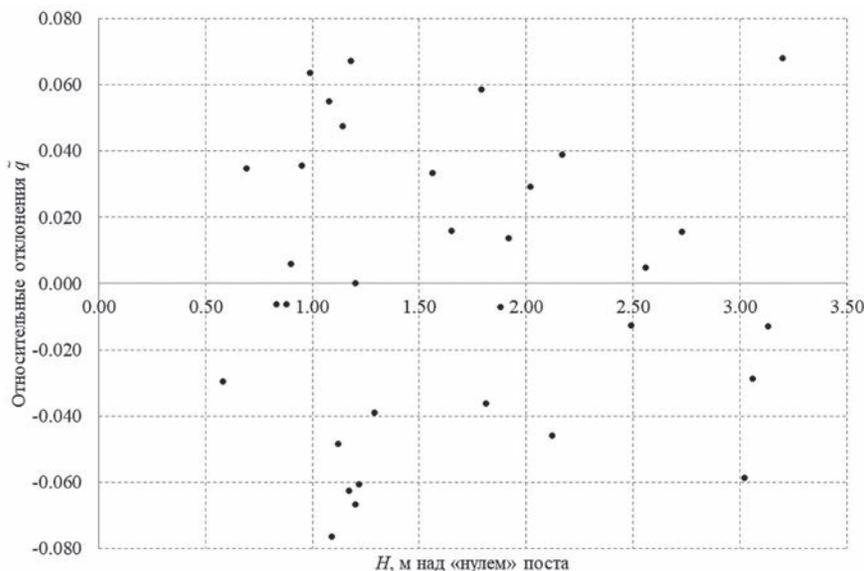


Рис. 1. График зависимости относительных отклонений от уровня воды по результатам аппроксимации кривой расходов полиномом 3-й степени с ограничениями.

Fig. 1. Graph of dependence of relative deviations from the water stage based on the results of stage-discharge rating curve approximation by a polynomial of degree 3 with restrictions.

где σ_p — стандартное отклонение рассеяния УР, n — длина исходной совокупности данных, $\sigma_{a_1}^2$ — дисперсия параметра a_1 линейного УР, \bar{H} — среднее значение уровня воды по исходной совокупности ИРВ.

Оценка ординаты линии регрессии в заданной точке t определяется по формуле [15]:

$$Q_{pt} = a_0^* + a_1^* (H_t - \bar{H}) \pm t_p \frac{\sigma_p^*}{\sqrt{n-2}} \sqrt{1 + \left(\frac{H_t - \bar{H}}{s_1} \right)^2}, \quad (5)$$

где a_0^* , a_1^* — оценки коэффициентов уравнения линейной регрессии; t_p — параметр распределения Стьюдента для p -процентного доверительного интервала; σ_p^* — среднеквадратическое значение отклонения точек ИРВ от линии (поверхности) регрессии, являющееся оценкой стандарта рассеяния УР; s_1 — стандартное отклонение переменной H .

Для многомерной регрессии формула (4) запишется в виде:

$$\sigma_{Q_{pt}}^2 = \frac{\sigma_p^2}{n-v} + \sum_{i,j=1}^k \sigma_{a_i}^2 \sigma_{a_j}^2 (X_{it} - \bar{X}_i)^2 (X_{jt} - \bar{X}_j)^2. \quad (6)$$

Здесь n — длина исходной совокупности ИРВ; k — число независимых переменных УР; v — число степеней свободы УР; $\sigma_{a_i}^2$, $\sigma_{a_j}^2$ — дисперсии параметров регрессии a_i , a_j ; $X_1 = H$, $X_2 = H^2$; ..., $X_k = H^k$; \bar{X}_i , \bar{X}_j — средние значения переменных, соответственно X_i и X_j .

Таким образом, уравнение регрессии $Q(X_1, \dots, X_k)$ воспроизводит Q с погрешностью приближения $\sigma_{Q_{pt}}$, которая выражается посредством суммирования дисперсий параметров регрессии a_0 , a_1 , ..., a_k .

Оценка ординаты поверхности многомерной регрессии в какой-нибудь заданной точке определяется по формуле [15]:

$$Q_{pt} = a_0^* + \sum_1^k a_i^* (X_{it}) \pm t_p \frac{\sigma_p^*}{\sqrt{n-k-1}} \sqrt{1 + \sum_{i,j=1}^k \frac{L_{i,j}}{L} (X_{it} - \bar{X}_i)(X_{jt} - \bar{X}_j)}. \quad (7)$$

Здесь через L и L_{ij} обозначены детерминант и его дополнения матрицы исходных данных (Q, H, H^k) .

Параметр t_p для доверительного интервала с вероятностью непревышения 95 % для УР с двумя степенями свободы равен 2,92, с тремя степенями свободы — 2,35.

Очевидно, что полоса неопределенности линии или поверхности регрессии, которая используется для расчета ежедневных расходов воды (ЕРВ) в режимном и оперативном вариантах, будет тем меньше, чем меньше степень аппроксимирующей функции, а наиболее узкой она будет при использовании линейной аппроксимации. Уменьшить ширину полосы неопределенности можно, выполнив подбор УР к преобразованным исходным данным с целью получения линейных уравнений, для которых по методу МНК определяются их параметры.

Так, при подборе уравнение в виде (1) для расчета по МНК параметров a и b выражение (1) преобразуется к логарифмическому виду:

$$\text{Ln}(Q) = \text{Ln}(a) + b \text{Ln}(H - H_0). \quad (8)$$

Параметры $\text{Ln}(a)$ и b уравнения (8) получают методом наименьших квадратов (МНК) на основе совокупности преобразованных данных ИРВ. К преобразованным переменным $Y = \text{Ln}(Q)$ и $X = (H - H_0)$ подбирается аппроксимирующий полином первой степени в виде:

$$Y = a_0 + a_1 X. \quad (9)$$

Затем уравнение вновь преобразуют к виду (1), в котором параметр $a = \exp(a_0)$, а показатель степени $b = a_1$. Здесь a_0 и a_1 — коэффициенты уравнения (9), полученные с использованием МНК.

В ГТИ предложен способ аппроксимации КР с использованием полиномиальной регрессии с ограничениями [11, 12], в котором за счет преобразования данных по МНК подбирается полином на одну степень меньше, чем конечное расчетное уравнение.

Аппроксимирующая функция, удовлетворяющая заданным ограничениям, записывается в следующем виде:

$$Q(H - H_{\text{низш}}) = \mu(H) + \nu(H) g(H - H_{\text{низш}}), \quad (10)$$

где $\mu(H)$ — полином, отвечающий заданным ограничениям; $\nu(H)$ — зануляющий полином, гарантирующий выполнение заданных ограничений; $g(H)$ — полином, подбираемый по МНК.

В порядке первого приближения первым двум полиномам придается вид:

$$\mu(H) = Q(H_{\text{низш}}) = \text{const}, \quad (11)$$

$$\nu(H) = H - H_{\text{низш}}. \quad (12)$$

Подбор аналитической формы полинома $g(H)$ производится на основе МНК с учетом критериев качества аппроксимации. При этом предварительно осуществляется преобразование исходных данных об ИРВ следующим образом:

$$Y_i = \frac{Q_{ii} - Q(H_{\text{низш}})}{H_{ii} - H_{\text{низш}}}, \quad (13)$$

где Q_{ii} — i -тый измеренный расход воды; H_{ii} — уровень воды, соответствующий измеренному расходу Q_{ii} .

Таким образом, в ЭВМ вводится совокупность исходных данных в виде Y_i и соответствующих им преобразованных значений уровней $(H_{ii} - H_{\text{низш}})$.

Например, чтобы получить конечное уравнение в виде полинома второй степени к преобразованным данным по МНК подбирается линейное УР в виде:

$$Y_i = a_0 + a_1(H - H_{\text{низш}}). \quad (14)$$

Чтобы получить конечное УР в виде полинома третьей степени к преобразованным данным по МНК подбирается уравнение в виде полинома второй степени:

$$Y_i = a_0 + a_1(H - H_{\text{низш}}) + a_2(H - H_{\text{низш}})^2. \quad (15)$$

После подбора полинома $g(H)$ параметры расчетного УР пересчитываются по формуле:

$$Q(H) = Q(H_{\text{низш}}) + (H - H_{\text{низш}})(a_0 + a_1(H - H_{\text{низш}}) + a_2(H - H_{\text{низш}})^2 + \dots + a_k(H - H_{\text{низш}})^k). \quad (16)$$

Таким образом, введение ограничений позволяет снизить на единицу степень полинома, который подбирается при аппроксимации КР с использованием МНК, что позволяет определить параметры конечного уравнения с меньшими погрешностями, а, следовательно, уменьшить полосу неопределенности КР.

Рассмотрим примеры аппроксимации годовой КР с использованием различных методов и выполним оценку границ полосы неопределенности полученных зависимостей. Для аппроксимации КР использовались следующие зависимости: УР в форме параболы Глушкова (1) и полиномы с ограничениями второй и третьей степени. В точке $H_{\text{низш}} = -1,6$ м задано ограничение для расхода воды $Q(H_{\text{низш}}) = 0$ м³/с. При выполнении преобразований переменных H и Q и выполнения расчетов по МНК уровни воды H выражены в м, расходы воды Q в м³/с. Коэффициенты УР a_i , аппроксимирующих КР для ГП р. Терек — с. Аликазган, приведены в табл. 1. Там же приведены значения стандартных отклонений коэффициентов УР — σ_{ai} .

Таблица 1

Параметры расчетных уравнений, аппроксимирующих кривую расходов воды для ГП р. Терек — с. Аликазган

Parameters of calculation equations approximating the stage-discharge rating curve for station riv. Terek — v. Alikazgan

Метод расчета ЕРВ	Количество ИРВ	Параметры уравнений/среднеквадратические отклонения					
		a	b	a_0	a_1	a_2	a_3
		y_a	y_b	y_{a0}	y_{a1}	y_{a2}	y_{a3}
полином 2-й степени	38			71,52	78,41	21,06	
				3,07	2,58	1,08	
	19			71,81	78,97	21,30	
				5,29	4,44	1,85	
				68,06	77,09	21,59	
парабола Глушкова	38	30,00	1,83				
		1,01	0,05				
	19	30,83	1,81				
		1,02	0,09				
		26,81	1,92				
полином 3-й степени	38			93,06	63,64	10,93	4,69
				2,46	2,35	1,02	0,14
	19			103,93	55,90	5,88	7,21
				3,71	3,53	1,52	0,20

Метод расчета ЕРВ	Количество ИРВ	Параметры уравнений/среднеквадратические отклонения					
		a	b	a_0	a_1	a_2	a_3
		y_a	y_b	y_{a0}	y_{a1}	y_{a2}	y_{a3}
полином 3-й степени	13			79,88 3,45	68,89 3,19	15,88 1,36	2,51 0,18

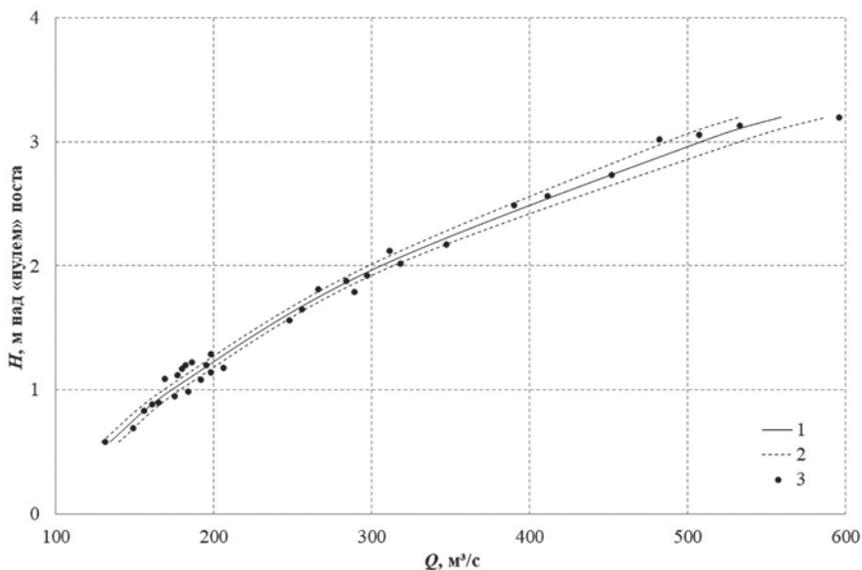


Рис. 2. Зависимость расходов от уровней воды $Q(H)$ с границами полосы неопределенности, рассчитанная по параболе Глушкова, ГП р. Терек — с. Аликазган по данным ИРВ за 2017 г.
 1 — зависимость $Q(H)$, 2 — границы неопределенности, 3 — измеренные расходы воды.
 Fig. 2. The stage-discharge relationship with the boundaries of the uncertainty band, calculated from the Glushkov parabola, station riv. Terek — v. Alikazgan from data of measured discharges for 2017
 1 — dependence $Q(H)$, 2 — uncertainty limits, 3 — measured discharge.

Графики полученных зависимостей в форме параболы Глушкова (1) и полинома с ограничениями третьей степени (2) с отображенными границами полосы неопределенности показаны на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

По результатам аппроксимации вычисляются значения абсолютных и относительных значений отклонений ИРВ от аппроксимирующего УР по следующим уравнениям:

$$\Delta Q = Q_n - Q(H_n), \tag{17}$$

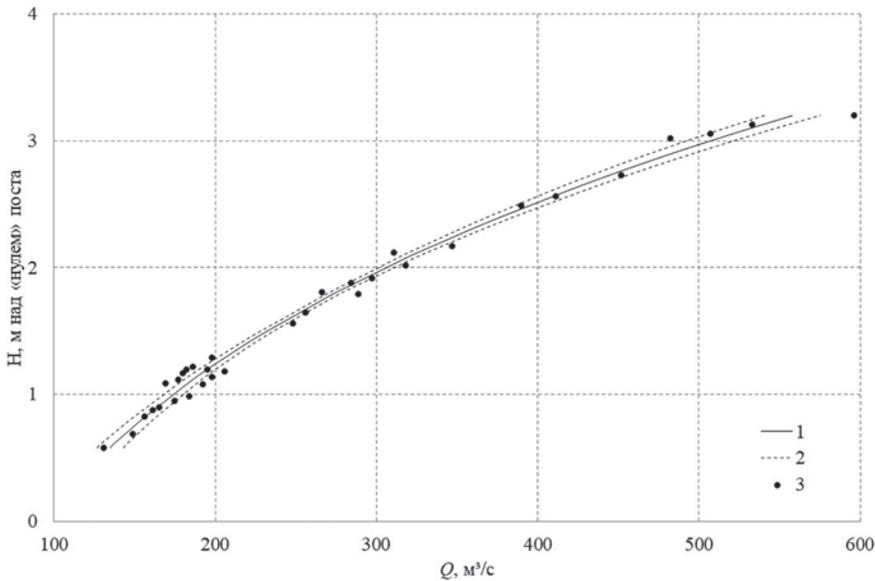


Рис. 3. Зависимость расходов от уровней воды $Q(H)$ с границами полосы неопределенности, рассчитанная по методу полиномиальной регрессии с ограничениями, ГП р. Терек — с. Аликазган по данным ИРВ за 2017 г.

1 — зависимость $Q(H)$, 2 — границы неопределенности, 3 — измеренные расходы воды.

Fig. 3. The stage-discharge relationship with the boundaries of the uncertainty band, calculated by the method of polynomial regression with restrictions, station riv. Terek — v. Alikazgan from data of measured discharges for 2017

1 — dependence $Q(H)$, 2 — uncertainty limits, 3 — measured discharge.

$$\tilde{q}_n = \frac{Q_n - Q(H_n)}{Q(H_n)}, \quad (18)$$

где Q_n — измеренный расход воды, $Q(H_n)$ — расход воды, полученный по связи $Q(H)$ для уровня H_n , зафиксированного во время измерения расхода воды Q_n .

В методах гидрометрического учета стока, разработанных в ГГИ и рекомендованных для использования на гидрологической сети Росгидромета [13, 14], временной ряд относительных отклонений $\tilde{q}_n(t)$ рассматривается как основная характеристика изменения пропускной способности русла, отражающая разброс точек ИРВ относительно осредняющей аппроксимирующей зависимости $Q(H)$. Изменения пропускной способности русла происходят под воздействием ряда сезонных, гидроморфологических и динамических факторов, таких как: ледовые явления зимой и зарастание в летнюю межень, деформации неустойчивого русла, переменный подпор от впадающих ниже притоков или размещенных в русле гидротехнических сооружений и т. п. По результатам сравнения дисперсии ряда относительных отклонений $\tilde{q}_n(t)$ ($\sigma_{\tilde{q}}^2$) и дисперсии относительных значений случайных

погрешностей измерения расходов воды ($\tilde{\sigma}_и^2$) выполняется оценка однозначности зависимости $Q(H)$ (КР) [11, 12], которая является основной предпосылкой для выбора метода гидрометрического учета стока. При наличии однозначной зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$ значения этих дисперсий близки между собой, а, следовательно, разброс точек ИРВ относительно аппроксимирующей зависимости $Q(H)$ обусловлен только случайными погрешностями измерения расходов воды.

Характеристики рядов относительных отклонений ИРВ от аппроксимирующих КР приведены в графах 4—7 табл. 2. В этой же таблице (графы 9, 10) приведены границы полосы неопределенности для верхней и нижней точек КР, которые выражены в процентах от значения расхода воды по КР. Расчеты и графики (рис. 2, рис. 3) показывают, что наименьшую ширину полоса неопределенности имеет в диапазоне средних значений расходов и уровней воды. В целом более узкая полоса неопределенности получена для варианта аппроксимации КР для ГП р. Терек — с. Аликазган с использованием полинома 3-й степени при заданных ограничениях в точке $H = -2,3$ м над «нулем» поста, $Q = 0$ м³/с.

Таблица 2

Результаты оценки качества аппроксимации КР разными методами,
ГП р. Терек — с. Аликазган по данным ИРВ за 2017 г.

The results of evaluating the quality of stage-discharge rating curve approximation by different methods, station riv. Terek — v. Alikazgan from data of measured discharges for 2017

Метод расчета ЕРВ	Число ИРВ	Характеристики относительных отклонений ИРВ от КР-				Относительное среднеквадратическое расхождение ЕРВ по полной и сокращенной совокупностям ИРВ $\sigma_{\Delta Q}$	Ширина полосы неопределенности, %		
		Среднеквадратическое $\sigma_{\tilde{q}}$	Среднее $m_{\tilde{q}}$	\tilde{q}_{\max} со знаком «+»	\tilde{q}_{\max} со знаком «-»		низ КР	верх КР	
полином 2-й степени	38	0,07	0,001	0,25	-0,13	0,008	9,5	5,1	
	19	0,09	0,002	0,24	-0,13		15,0	8,6	
	13	0,06	0,001	0,09	-0,10		0,018	11,8	5,6
парабола Глушкова	38	0,07	0,002	0,24	-0,13	0,008	6,0	7,4	
	19	0,09	0,004	0,23	-0,14		0,008	10,0	12,5
	13	0,06	0,001	0,09	-0,11		0,026	9,1	9,2
полином 3-й степени	38	0,06	0	0,15	-0,12	0,017	6,2	3,9	
	19	0,06	0	0,12	-0,12		0,017	9,1	5,8
	13	0,05	0	0,05	-0,10		0,028	9,4	5,2

В ходе исследований по более чем двадцати постам в бассейнах рек Обь, Терек, Сулак и Самур были выполнены численные эксперименты по оптимизации измерений расходов воды. Аппроксимации КР были выполнены по полной и сокращенным в два и три раза совокупностям ИРВ. Относительные значения расхождений ЕРВ, рассчитанных по полученным КР, вычислялись по формуле:

$$\overline{\Delta Q_{1,2}} = \frac{(Q_{c1,2} - Q)}{Q}, \quad (19)$$

где Q_n — расход воды, вычисленный по КР, полученной по полной совокупности данных ИРВ ($n = 38$); $Q_{c1,2}$ — расход воды, вычисленный по сокращенным совокупностям при $n = 19$ и $n = 13$.

Относительные среднеквадратические значения расхождений ЕРВ $\sigma_{\Delta Q}$, рассчитанных по разным кривым КР приведены в графе 8 табл. 2.

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что при оптимально подобранной аппроксимации кривой расходов воды количество ИРВ для ее обоснования может быть сокращено в два или даже три раза без ущерба точности расчета ежедневных расходов воды.

Выполним оценку осредненных по времени характеристик стока, которые получают как среднее арифметическое ЕРВ за период T (декада, месяц, год).

Погрешности σ_{epk} осредненных расходов воды Q_T рассчитываются по закону сложения дисперсий и осреднения их по числу интервалов между измерениями расходов воды ($n-1$):

$$\tilde{\sigma}_T^2 = \sum_{k=1}^{k=n-1} \tilde{\sigma}_{\text{epk}}^2 / (n-1). \quad (20)$$

При равенстве σ_k будем иметь:

$$\tilde{\sigma}_T = \tilde{\sigma}_{\text{epk}} / \sqrt{(n-1)}. \quad (21)$$

При оценке погрешностей характеристик стока, осредненных за длительный период T (сезон и год), необходимо исходить из тех же предпосылок о статистических свойствах σ_{ep} и, кроме того, учесть осредненные значения расходов воды $\overline{Q_i}$ и длительность периодов T_i , к которым они относятся:

$$\sigma_T = \left[\sum \left(\left(\left(\frac{t_i}{T} \right) \sigma_{\text{epi}} \right) / (n_i - 1) \right) \right]^{0,5}, \quad (22)$$

где n_i — количество измерений расходов воды за период t_i .

При оценке погрешностей осредненных характеристик полезно использовать результаты расчета численных значений погрешностей ЕРВ при различном количестве ИРВ, взятых для обоснования КР n , и учесть при этом относительные значения водности реки в расчетном периоде. Относительное значение водности определяется параметром k_p , так называемым модульным коэффициентом:

$$k_i = \overline{Q_i} / \overline{Q_T}, \quad (23)$$

где $\overline{Q_i}$ — средний расход воды в i -ом расчетном периоде; $\overline{Q_T}$ — расход, осредненный за длительный период (сезон, год).

На рис. 4 приведены зависимости относительных погрешностей вычисления ЕРВ от количества ИРВ, принятых для построения КР, и относительных значений расходов воды Q/\bar{Q} соответственно для многолетней и годовой кривых расходов. На рис. 4 видно, что заметное увеличение погрешности расчета ЕРВ при сокращении количества ИРВ отмечается в диапазоне наименьших расходов воды при $Q < 0,5\bar{Q}$.

Результаты расчета погрешностей ежедневных и осредненных за декаду, месяц и год расходов воды, рассчитанных с использованием полной ($n = 37$) и сокращенной ($n = 13$) совокупностей ИРВ для обоснования КР приведены в табл. 3 и табл. 4.

Результаты оценок погрешностей учета стока на ГП р. Терек — с. Аликазган, 2017 г., приведенные в табл. 3 и табл. 4, показывают, что даже при сокращении данных ИРВ, принятых для обоснования однозначной КР 2017 г. в три раза, средние квадратические погрешности ЕРВ, средних декадных и средних месячных значений не превысят 3,3 %, наибольшие, с вероятностью неперевышения 95 %, 7,8 %. Погрешность среднего годового расхода воды составит 1,8 %.

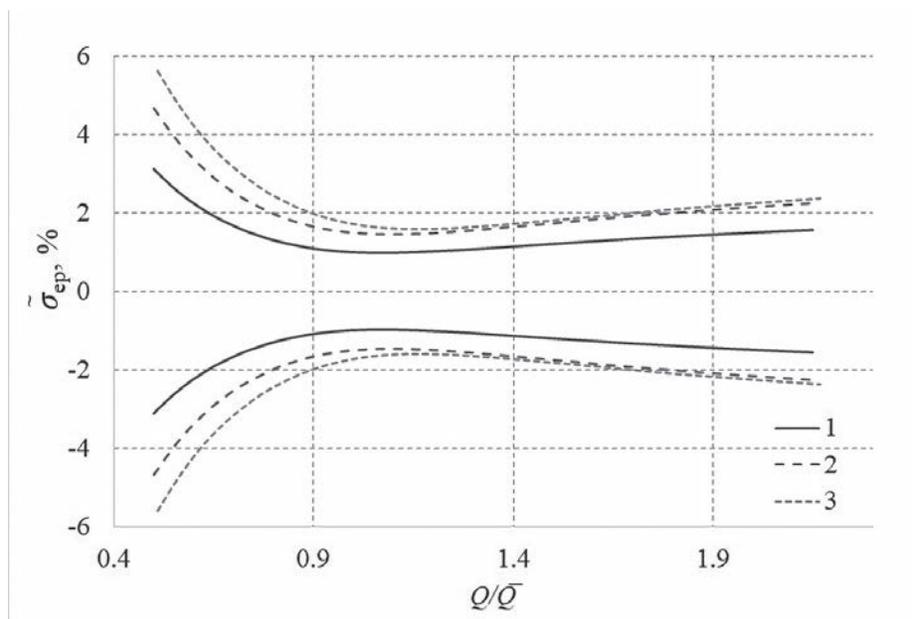


Рис. 4. Зависимость относительных погрешностей вычисления ЕРВ от числа ИРВ n и относительного расхода воды Q/\bar{Q} , р. Терек — с. Аликазган, 2017 г.
1) $n = 37$; 2) $n = 19$; 3) $n = 13$.

Fig. 4. Dependence of relative errors of calculation of daily discharges on the number of measured discharges and relative discharge, riv. Terek — v. Alikazgan, 2017
1) $n = 37$; 2) $n = 19$; 3) $n = 13$.

Таблица 3

Оценки погрешностей и границ неопределенности (в %) 95 % вероятности непревышения осредненных характеристик речного стока, рассчитанных по однозначной кривой, обоснованной данными 37 измеренных расходов воды, р. Терек — с. Аликазган, 2017 г.
Estimates of uncertainty errors and limits 95% of the probability of not exceeding the averaged characteristics of river flow calculated from an unambiguous stage-discharge rating curve justified by data from 37 measured discharges, riv. Terek — v. Alikazgan, 2017

Характеристика стока	k_i	n_i	ЕРВ, %		Средне-декадные, %		Средне-месячные, %		Средне-годовые, %	
			Среднеквадратическая	Наибольшая, P = 95 %						
Межень с 01.01 по 18.05	0,76	9	1,60	3,30	1,60	3,3	1,1	2,3	0,51	1,11
Половодье, паводки с 19.05 по 12.09	1,6	19	1,27	1,85	1,27	1,85	0,64	0,93		
Межень с 13.09 по 31.12	0,68	9	1,75	4,2	1,8	4,2	1,24	2,98		

Таблица 4

Оценки погрешностей и границ неопределенности (в %) 95 % вероятности непревышения осредненных характеристик речного стока, рассчитанных по однозначной кривой, обоснованной данными 13 измеренных расходов воды, р. Терек — с. Аликазган, 2017 г.
Estimates of uncertainty errors and limits 95% of the probability of not exceeding the averaged characteristics of river flow calculated from an unambiguous stage-discharge rating curve justified by data from 13 measured discharges, riv. Terek — v. Alikazgan, 2017

Характеристика стока	k_i	n_i	ЕРВ, %		Средне-декадные, %		Средне-месячные, %		Средне-годовые, %	
			Среднеквадратическая	Наибольшая, P = 95 %						
Межень с 01.01 по 18.05	0,76	3	2,75	6,60	2,75	6,60	2,75	6,60	1,82	4,32
Половодье, паводки с 19.05 по 12.09	1,6	7	1,90	4,50	1,90	4,50	1,90	4,50		
Межень с 13.09 по 31.12	0,68	3	3,34	7,80	3,34	7,80	3,34	7,80		

Выводы

В результате выполненных исследований получен алгоритм расчета границ полосы неопределенности кривой расходов воды, который может быть использован для оценки неопределенностей расчета ежедневных расходов воды при подготовке таблиц справочников водного кадастра. Оценка границ полосы неопределенности кривой расходов расширяет возможности при выборе оптимального способа ее аппроксимации и оптимизации измерений расходов воды для

обоснования КР. Численные эксперименты, выполненные по данным более чем двадцати постов в бассейнах рек Обь, Терек, Сулак и Самур, показали, что при оптимально подобранной аппроксимации кривой расходов воды количество ИРВ для ее обоснования может быть сокращено в два или даже три раза без ущерба точности расчета ежедневных расходов воды. Так, при сокращении исходной совокупности ИРВ 2017 г. для ГП Терек — с Аликазган почти в три раза (с 37 до 13) рассчитанные значения среднеквадратических погрешностей ЕРВ увеличились всего на 0,5—1,5 %, среднегодового расхода воды — на 1,5 %; соответствующие погрешности с вероятностью непревышения 95 % увеличились для ЕРВ — менее, чем на 4 %, среднегодового расхода воды — на 3,2 %.

Список литературы

1. Алексеев Г. А. Методы оценки случайных погрешностей гидрометеорологической информации. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 96 с.
2. Dyck S. *Angewandte Hydrologie*. Teil 1. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1980. 528 p.
3. Карасев И. Ф., Яковлева Т. И. Методы оценки погрешностей гидрометрического учета стока // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 6. С. 96—106.
4. Shiklomanov A. I., T. I. Yakovleva, R. B. Lammers et al. Cold Region River Discharge Uncertainty — Estimates from Large Russian Rivers // *Journal of Hydrology*, 2006. №326. P.231—256. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.10.037.
5. ВМО-№ 168. Руководство по гидрологической практике. Том 1. Гидрология: от измерений до гидрологической информации. 6 издание. 2011. 324 с.
6. Grey S. Nearinga, Yudong Tianb, Hoshin V. Guptad et al. A philosophical basis for hydrological uncertainty // *Hydrological sciences journal*. Journal des sciences hydrologiques. 2016. vol. 61. № 9. P. 1666—1678. DOI: 10.1002/wat2.1319.
7. ISO/IEC Guide 98.3:2008. Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, IDT.
8. Baldassarre G. Di and Montanari A. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. vol. 3. P. 913—921. DOI: 10.5194/hessd-6-39-2009.
9. Hamilton A. S. and Moore R. D. Quantifying Uncertainty in Streamflow Records // *Canadian Water Resources Journal*. 2012. vol. 37:1. P. 3—21. DOI: 10.4296/cwrj3701865.
10. McMahon T. A. and Peel M. C. Uncertainty in stage-discharge rating curves: application to Australian Hydrologic Reference Stations data // *Hydrological Sciences Journal*. 2019. vol. 64:3. P. 255—275. DOI: 10.1080/02626667.2019.1577555.
11. Карасев И. Ф., Яковлева Т. И. Усовершенствованные методы гидрометрического учета стока // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. М.: Метеоагентство Росгидромета. 2006. С. 156—163.
12. Изъюрова Ю. В. Развитие методов гидрометрического учета и увязки стока / Ю. В. Изъюрова, Т. И. Яковлева // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 1. С. 48—57. – DOI: 10.52001/0130-2906-2024-1-48-57.
13. Карасев И. Ф., Винников С. Д., Кучеренко О. Е. Экстраполяция максимальных расходов воды при нестационарном движении руслового потока // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2012. № 25. С. 20—25.
14. Себер Дж. *Линейный регрессионный анализ*. М.: Мир, 1980. 456 с.
15. Крамер Г. *Математические методы статистики*. М.: Мир, 1975. 648 с.

References

1. Alekseev G. A. *Metody otsenki sluchainykh pogreshnostei gidrometeorologicheskoi informatsii = Methods for estimating random errors of hydrometeorological information*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975; 96 p. (In Russ.).
2. Dyck S. *Angewandte Hydrologie*. T. I. Berlin, 1976; 512 p.

3. Karasev I. F., Iakovleva T. I. Methods for estimating errors in hydrometric flow accounting. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorologiya i gidrologiya*, 2001; (6): (96—106). (In Russ.).
4. Shiklomanov A. I., T. I. Yakovleva, R. B. Lammers et al. Cold Region River Discharge Uncertainty — Estimates from Large Russian Rivers. *Journal of Hydrology*. 2006; (326): (231—256).
5. VMO-№ 168. Guide to Hydrological Practices, Volume I. Management of Water Resources and Applications of Hydrological Practices. 6 izdanie. 2011; 1.2-14 p. (In Russ.).
6. Grey S. Nearinga, Yudong Tianb, Hoshin V. Guptad et al. A philosophical basis for hydrological uncertainty. *Hydrological sciences journal — Journal des sciences hydrologiques*. 2016; (9): 1666—1678.
7. ISO/IEC Guide 98.3:2008. Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, IDT.
8. Baldassarre G. Di and Montanari A. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009; (3): (913—921).
9. Hamilton A. S. and Moore R. D. Quantifying Uncertainty in Streamflow Records. *Canadian Water Resources Journal*. 2012; 37 (1): (3—21).
10. McMahan T. A. and Peel M. C. Uncertainty in stage-discharge rating curves: application to Australian Hydrologic Reference Stations data. *Hydrological Sciences Journal*. 2019; 64 (3): (255—275). doi: 10.1080/02626667.2019.1577555
11. Karasev I. F., Iakovleva T. I. Improved methods of hydrometric flow accounting. *Doklady VI Vserossiiskogo gidrologicheskogo s'ezda. Sektsiya I. = Reports of the VI All-Russian Hydrological Congress. Section I*. 2006; (156—163). (In Russ.).
12. Iz'yurova YU. V., Yakovleva T. I. Development of methods for hydrometric computation and coordination of streamflow. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorologiya i gidrologiya*, 2024 (1): (48—57). (In Russ.).
13. Karasev I. F., Vinnikov S. D., Kucherenko O. E. Extrapolation of maximum water flows during unsteady movement of channel flow. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2012; (25): (20—25). (In Russ.).
14. Seber Dzh. *Lineinyi regressionnyi analiz = Linear regression analysis*. Moscow: Mir, 1980; 456 p. (In Russ.).
15. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki = Mathematical methods of statistics*. Moscow: Mir, 1975; 648 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Аксянов Тимур Менирович, научный сотрудник отдела гидрометрии и гидрологической сети Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный гидрологический институт», agon1982@mail.ru.

Яковлева Татьяна Ивановна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, зав. отдела гидрометрии и гидрологической сети Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный гидрологический институт», tiya-ilichovo@yandex.ru.

Information about authors

Aksyanov T. M., Federal State Budgetary Institution “State Hydrological Institute”, Department of Hydrometry and Hydrological Network, Scientific researcher.

Yakovleva T. I. Federal State Budgetary Institution “State Hydrological Institute”, Department of Hydrometry and Hydrological Network, Leading Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.03.2024

Принята в печать после доработки 21.07.2024

The article was received on 11.03.2024

The article was accepted after revision on 21.07.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 524—541.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):524—541.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.388:678.5
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-524-541

Методические особенности выделения частиц микропластика из проб грунта водных объектов

***Александра Александровна Ершова¹, Екатерина Викторовна Иванова²,
Дарья Алексеевна Тихонова², Ирина Николаевна Макеева¹***

¹ ПластикЛаб, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, plasticlab.2019@gmail.com

² Институт озероведения РАН — Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН)

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительных экспериментов лаборатории ПластикЛаб (РГГМУ) и научной группы ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по подготовке проб грунта водных объектов для выделения частиц микропластика из матрицы. Сравняются методы экстракции микропластика с помощью термостакана, делительной воронки и специальной установки. Наименее эффективным является метод экстракции в термостакане, когда теряется в среднем до 40 % контрольных частиц микропластика. При проведении процедуры плотностного разделения для экстракции микропластика из проб грунта целесообразно применение делительной воронки, которая обеспечивает, во-первых, достаточную изоляцию образца от внешней среды (для исключения воздушного загрязнения) и, во-вторых, эффективное извлечение супернатанта с содержащимся в нем микропластиком, исключающее потери частиц при переносе образца. Особое внимание при обработке проб грунта следует уделять контролю качества анализа и соблюдению чистоты эксперимента.

Ключевые слова: микропластик, водная среда, грунт, донные отложения, пробоподготовка, плотностное разделение, делительная воронка.

Благодарности: Работа ПластикЛаб РГГМУ проведена при поддержке проекта Госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002. Работа ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования»).

Для цитирования: Ершова А. А., Иванова Е. В., Тихонова Д. А., Макеева И. Н. Методические особенности выделения частиц микропластика из проб грунта водных объектов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 524—541. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-524-541.

Original article

Methodological features of microplastics extraction from samples of bottom sediments of water bodies

***Alexandra A. Ershova¹, Ekaterina V. Ivanova²,
Daria A. Tikhonova², Irina N. Makeeva¹***

¹ PlasticLab, Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia, plasticlab.2019@gmail.com

² Institute of Limnology Russian Academy of Sciences - St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russia

Summary. This paper discusses the existing international recommendations for the isolation of microplastics from various environmental matrices, and also presents the results of several comparative (intercalibration) experiments on the sample preparation of bottom sediments for the analysis of the content of microplastics between the PlasticLab laboratory (RSHU) and the scientific group of the Institute of Limnology RAS — St. Petersburg Federal Research Center RAS. Methods for extracting microplastics from sediments using a thermal glass, a separating funnel and a special installation are compared. The least effective of the considered methods is the sediment settling in a thermal glass, when up to 40% of control microplastic particles are lost. It is recommended to use other special types of instruments intended for the density separation procedure, such as a separating funnel or an SMI-installation for extracting microplastics from bottom sediments, which provide, firstly, sufficient isolation of the sample from the external environment (to exclude contamination) and, secondly, the efficient extraction of the supernatant with the microplastics, eliminating the loss of particles during the transfer of the sample. Recommendations on maintaining the purity of the experiment are presented.

Keywords: microplastics, aquatic environment, bottom sediments, laboratory processing of samples, density separation.

Acknowledgments: PlasticLab laboratory work was supported by the State Task of Ministry of Education and Science of Russia № FSZU-2023-0002. Institute of limnology work was supported by the State Task of Institute of Limnology Russian Academy of Sciences - St. Petersburg Federal Research Center RAS, theme FFZF-2024-0002 «Modern hazards to water bodies and innovative methods of their conservation, restoration and rational use».

For citation: Ershova A. A., Ivanova E. V., Tikhonova D. A., Makeeva I. N. Methodological features of microplastics extraction from samples of bottom sediments of water bodies. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):524—541. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-524-541.

Введение

Исследования содержания микропластика в различных компонентах природной среды — матрицах (вода, донные отложения, биота) активно ведутся последние 20 лет в связи с появлением понятия «микропластик» как загрязнитель природной среды [1]. Однако вопросы методического обеспечения таких исследований на сегодняшний день еще не решены. В 2012 г. Hidalgo-Ruz et al. [2] в своем обзоре методических подходов одними из первых обозначили необходимость установления и утверждения общей стандартной процедуры для отбора проб,

экстракции частиц микропластика из пробы (очистки пробы от природного органического вещества и минеральной взвеси) и химической идентификации частиц для возможности сравнения результатов различных исследований. Последние научные обзоры рассматривают и обобщают существующие методы отбора проб, их обработки и анализа в морской и пресноводной среде [3—11], а также в почвенных образцах [12] и биоте [13], показывая при этом их несогласованность. Особенно остро стоит вопрос обеспечения качества и контроля качества исследований (ОК/КК), меры и процедуры для которых зачастую не соблюдаются и не указываются в представляемых результатах исследований [14—16].

Для решения этих проблем в конце 2023 г. был выпущен первый всемирный стандарт анализа микропластика в окружающей среде ISO/FDIS 24187 «Principles for the analysis of microplastics present in the environment» [17], который рассматривает базовые принципы выделения микропластика из природных проб. Методические вопросы обозначены в этом документе лишь в общем виде, однако он является важным шагом к стандартизации исследований в мире. В частности, в этом документе утверждено определение размерной категории частиц микропластика: «крупный микропластик» – от 1 мм до 5 мм и «микропластик» – от 1 мкм до 1000 мкм [17].

В настоящее время российские исследователи руководствуются международными и региональными руководящими документами по мониторингу морского мусора и микропластика (например, для Арктического региона [18] и для Евросоюза [19]), так как в Российской Федерации такие документы еще находятся в разработке. Важнейшей инициативой по гармонизации методик исследования содержания микропластика в окружающей среде Балтийского моря стала работа экспертов ХЕЛКОМ (Хельсинкская комиссия по защите морской среды Балтийского моря) в рамках Регионального плана действий по морскому мусору для Балтийского моря — RAP ML. В рамках проекта HELCOM BLUES [20] в 2021—2022 гг. было проведено сравнение методик исследования содержания микропластика в компонентах окружающей среды в ведущих лабораториях 9 стран ХЕЛКОМ, включая Россию (от России в проекте участвовала А. А. Ершова, эксперт ХЕЛКОМ в группе по морскому мусору от Российской Федерации). Особенно тщательно рассматривались различия аналитических протоколов для обработки проб морской воды и образцов морского грунта (донных отложений). Например, для растворения природного органического материала ХЕЛКОМ рекомендует применять реактив Фентона при температуре не выше 40 °С в связи с высоким риском деградации некоторых синтетических полимеров при температуре нагрева выше 60 °С. Более щадящие (но дорогие и времязатратные) методы, основанные на использовании ферментов (энзимное растворение), применяются только в 5 из 11 лабораторий стран Балтийского региона и лишь как дополнительный этап после основного этапа обработки пробы перекисью водорода или щёлочью. Результатом проекта HELCOM BLUES стали региональные руководящие документы по мониторингу микромусора в донных отложениях и морской воде в соответствии с существующими подходами и возможностями лабораторий в регионе Балтийского моря [20].

Продолжением этой работы по гармонизации методик в Балтийском регионе стал сличительный эксперимент (интеркалибрация), проведенный в апреле 2021 г. в регионе Финского залива в рамках Трёхстороннего сотрудничества по Финскому заливу (The Gulf of Finland Trilateral Cooperation), между четырьмя лабораториями Финляндии, Эстонии и России, который стал первым международным сличительным экспериментом с участием представителей лабораторий из Российской Федерации. В эксперименте участвовали лаборатория ПластикЛаб РГГМУ (руководитель Ершова А. А.) и научная группа ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (руководитель Иванова Е. В.). В работе оценивались методы обработки образцов и количественного определения микропластика, применяемые в разных лабораториях для оценки влияния различий лабораторных протоколов на количество микропластика, обнаруженного в образцах. Пробоподготовка и анализ образцов компонентов окружающей среды (матриц) являются ключевыми этапами в исследованиях микропластика и определяют достоверность и качество результатов [8, 14, 16]. Данный эксперимент был направлен на оценку степени экстракции и количественного определения искусственно добавленного микропластика (полистироловые гранулы), а также количественной оценки «природного» микропластика в двух матрицах: морской воде (отбор пробы из поверхностного слоя воды Манта-тралом, размер ячеи 300 мкм) и донных отложениях (отбор проб дночерпателем, верхние 5 см осадка) в восточной части Финского залива. Целевая фракция исследуемого микропластика составила > 300 мкм для проб воды и > 100 мкм для донных отложений. Каждая лаборатория работала с тремя повторностями природных образцов, в которые добавлялись искусственные гранулы размером 150—325 мкм.

В целом, несмотря на некоторую разницу используемых протоколов лабораторной обработки (например, использование пероксидного или энзимного разложения природного органического вещества, разной химической посуды и др.), результаты всех четырех лабораторий были сравнимы. Отмечена высокая степень извлечения контрольных частиц микропластика ($> 92\%$) для всех лабораторий — участников эксперимента, результаты которого ранее, к сожалению, не были опубликованы. При этом она была значительно выше в пробах морской воды, в отличие от образцов донных осадков, где потери частиц были связаны с большим количеством этапов обработки образцов грунта (в первую очередь с введением этапа плотностного разделения). Наибольшая разница в результатах определения содержания «природного» микропластика в лабораториях наблюдалась для проб донных отложений. Сличительный эксперимент 2021 г. подчеркнул, что все лабораторные протоколы, используемые лабораториями-участниками, имеют свои недостатки, которые могут привести к недооценке или завышению общей концентрации микропластика и к увеличению различий между лабораториями.

Действительно, подготовка проб является одним из основных этапов исследования, в процессе которого происходят потери микропластика из образцов и одновременно контаминация (внешнее загрязнение), то есть привнесение новых частиц [16]. При этом образцы могут сильно отличаться в зависимости от среды (морской или пресноводной) по количеству и составу природного органического

вещества, а пробы донных отложений всегда отличаются по составу самих отложений, крупности осадка и т. д., что сильно влияет на выбор процедуры обработки образцов. Важнейшими этапами в пробоподготовке служат этапы уменьшения объема образца (концентрирование пробы) и удаления природных компонентов пробы, которые проводятся в зависимости от типа материала путем сухого или мокрого просеивания (процесс фракционирования образца по размеру), плотностного разделения, а также растворения органического материала [3, 6—8]. В зависимости от типа матрицы исследуемых образцов выбираются подходящие этапы обработки, которые также могут комбинироваться и повторяться для подготовки образца к полимерной идентификации.

Этап плотностного разделения является одним из ключевых в процессе пробоподготовки образцов грунта и очень частым при работе с образцами речной и озерной воды, богатой взвешенным минеральным веществом [3, 11]. Процесс основан на свойстве плавучести частиц пластика и проводится с использованием растворов с плотностью выше, чем плотность большинства синтетических полимеров, встречающихся в природных средах. Растворы, применяемые для выделения микропластика, различаются плотностью, и, соответственно, процентом выделяемых частиц микропластика [21]. Более дешевый раствор соли NaCl имеет плотность всего 1,2 г/см³, что не позволяет выделить очень многие виды полимеров [6], поэтому в настоящее время рекомендованными растворами для плотностного разделения являются растворы с плотностью более 1,7 г/см³ [6, 8, 20], например, хлорид цинка ZnCl₂ (1,7 — 1,8 г/см³) и поливольфрамат натрия Na₆H₂W₁₂O₄₀ (до 3,1 г/см³). При этом каждый раствор имеет как достоинства (высокая плотность), так и недостатки (токсичность, высокая цена), поэтому выбор раствора зависит от оснащения и возможностей лаборатории. После проведения этапа плотностного разделения супернатант (надосадочная жидкость) с частицами микропластика сливается для дальнейшей обработки образца (очистка от природного органического вещества и осаждение частиц на фильтр для последующего количественного и качественного анализа).

Этап плотностного разделения проводится с помощью различного лабораторного инструментария (делительные воронки, стаканы, сепараторы), и выбор химической посуды является ключевым с точки зрения экстракции частиц микропластика с одной стороны, и контаминации образца — с другой. Такой вывод был сделан в рамках проведенного в 2021 г. сличительного эксперимента в регионе Финского залива, когда было установлено, что наибольшие потери частиц микропластика были связаны с использованием термостаканов для отстаивания образцов на этапе плотностного разделения.

С целью уточнения роли различной химической посуды и специальных сепарирующих устройств в обработке образцов грунта, за счет которых происходит искажение итоговых результатов по представлению количества микропластика в природном образце, был проведен специальный сличительный эксперимент между лабораториями ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, результаты которого представлены в настоящей работе.

Материалы и методы исследования

Для проведения сличительных экспериментов по выделению частиц микропластика из донного грунта водных объектов между лабораториями ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН использовались 3 пробы донных отложений Ладожского озера: 1 проба песчаных отложений в Черемухинском заливе (проба №1) и 2 пробы илистого грунта вблизи города Лахденпохья (проба №2) и острова Валаам (проба №3). Пробы отбирались дночерпателем Ван-Вина; для анализа отбиралось до 5 см верхнего ненарушенного слоя осадка. Каждая из проб была разделена на две равные части и направлена для анализа в каждую лабораторию, где обрабатывалась согласно протоколам, принятым в соответствующей лаборатории. Для оценки эффективности извлечения частиц микропластика с помощью используемых методик в каждую пробу были добавлены контрольные полистирольные микрогранулы (по 20 шт.) размером 150—325 мкм (Polysciences Europe GmbH).

Лабораторные протоколы ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН

Процесс обработки проб грунта (донных отложений) в обеих лабораториях в рамках сличительного эксперимента включал следующие этапы. Первый этап — экстракция пластиковых частиц с помощью процедуры плотностного разделения в насыщенном растворе соли $ZnCl_2$ (плотность 1,7—1,8 г/см³) с помощью стеклянного термостакана (в обеих лабораториях) (методика NOAA [22]), а также с помощью делительной воронки (в ПластикЛаб РГГМУ) и SMI-установки (в лаборатории ИНОЗ РАН). SMI-установка — Sediment-Microplastic Isolation unit — состоит из двух полипропиленовых труб диаметром 75 мм, соединенных шаровым краном (рис. 1), и была впервые предложена в работе [21]. На первом этапе вся масса грунта тщательно перемешивалась (гомогенизировалась), для каждого вида используемого оборудования отбиралась аликвота 50 г образца. Последующие

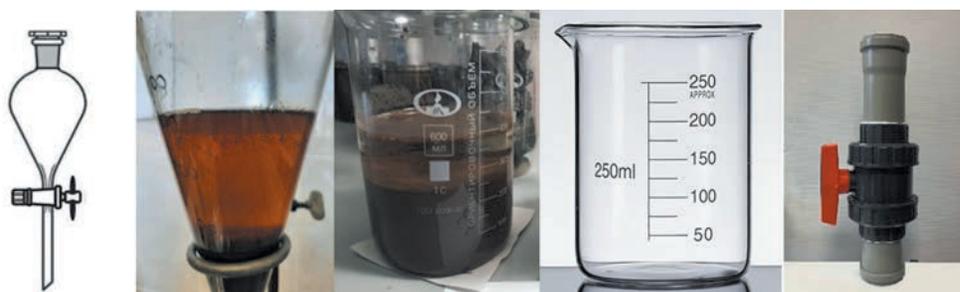


Рис. 1. Лабораторная посуда, используемая в эксперименте в лаборатории ПластикЛаб РГГМУ, с исследуемым образцом грунта в насыщенном растворе $ZnCl_2$: делительная воронка (слева) и химический термостакан (в центре). Справа — SMI-установка согласно [21], используемая в лаборатории ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН.

Fig. 1. Laboratory equipment used in the experiment by PlasticLab RSHU with the sediment sample in the saturated $ZnCl_2$ solution: separation funnel (left) and a thermal beaker (middle). Right — SMI-installation as in [21] used in the laboratory of INOZ RAS – SPB FIC RAS.

этапы включали растворение природного органического материала в образце (пероксидное окисление с реактивом Фентона), визуальное определение микропластиковых частиц с помощью оптического микроскопа и цифровой камеры, а также верификация частиц с помощью метода горячей иглы (в ПластикЛаб РГГМУ) или флуоресцентной микроскопии с использованием липофильного красителя Нильский красный (ИНОЗ РАН). В обеих лабораториях идентифицировались синтетические частицы в размерном диапазоне от 100 мкм до 5000 мкм. Сравнительное описание используемых лабораторных протоколов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительное описание используемых лабораторных протоколов в ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН

Comparative description of laboratory protocols used in PlasticLab RSHU and INOZ RAS

Используемое оборудование	ПластикЛаб РГГМУ		ИНОЗ РАН	
	Делительная воронка (V = 1000 мл)	Термостакан (V = 600 мл)	SMI-установка (V = 1500 мл)	Термостакан (V = 600 мл)
Плотностное разделение	50 г грунта + 100 мл р-ра ZnCl ₂	50 г грунта + 300 мл р-ра ZnCl ₂	50 г грунта + 1300 мл р-ра ZnCl ₂	50 г грунта + 300 мл р-ра ZnCl ₂
	Отстаивание образца в растворе соли при комнатной температуре			
	Отстаивание – 12 ч, перемешивание, отстаивание еще 12 ч. Слив осадка. Слив супернатанта сразу на нейлоновый фильтр с ячейкой 82 мкм.	Отстаивание – 24 ч, слив супернатанта на нейлоновый фильтр (82 мкм), добавление в стакан р-ра ZnCl ₂ , отстаивание 12 ч (3 повторения). Слив супернатанта на фильтр.	Отстаивание – 2 ч, слив верхнего супернатанта на металлическую сеть (60 мкм). Повторный долив в установку р-ра ZnCl ₂ , отстаивание, слив супернатанта на сеть. Повторный смыв с сети в колбу.	Отстаивание – 24 ч, слив супернатанта на металлическую сеть (60 мкм). Смыв частиц с сети в колбу дист. водой. Повторный долив в стакан р-ра ZnCl ₂ , отстаивание – 2 ч, слив супернатанта на сеть. Повторный смыв с сети в колбу.
Растворение природного органического вещества	Пероксидное окисление с реактивом Фентона: 20 мл 30% H ₂ O ₂ + Fe(II) (катализатор) в условиях водяной бани (T = 65 °C, max – 50 мин). После остывания фильтра с образцом добавляется 10 мл соляной кислоты (1:1), после чего сразу производится тщательный смыв образца с фильтра дист. водой на новый фильтр (с ячейкой 82 мкм), который помещается в чашку Петри до его полного высыхания при комнатной температуре.		Пероксидное окисление с реактивом Фентона: 30% H ₂ O ₂ + Fe(II) (катализатор) в пропорции к грунту 1:1 в условиях песчаной бани (T = 75 °C, 40–60 мин), отстаивание пробы в течение суток. Осадок из колбы фильтруется через сетку 60 мкм, тщательно промывается и смывается дистиллированной водой на чашку Петри. Чашка Петри накрывается металлической сеткой и помещается в сушильный шкаф с температурой 50 °C до полного испарения жидкости.	
Идентификация частиц микропластика	Стереомикроскоп Levenhuk (40x), цифровая камера Levenhuk M1000. Верификация частиц: метод «горячей иглы» (количественный подсчет и морфологический анализ частиц).		Оптические микроскопы Euler Professor 770T и Levenhuk Rainbow 2L PLUS с цифровой камерой Levenhuk C510. Верификация частиц: метод флуоресцентной микроскопии с использованием липофильного красителя Нильский красный.	

Методы верификации частиц также представлены в табл. 1. В лаборатории ПластикЛаб для идентификации и верификации «природных «синтетических частиц (в случаях, когда нет необходимости подтверждать состав полимера) применяется метод «горячей иглы» [23], который позволяет быстро и достаточно достоверно [24] определить принадлежность частицы к классу искусственных полимеров. При приближении нагретой иглы полимерные частицы плавятся, в то время как природные органические частицы либо совсем не реагируют, либо темнеют и сгорают. Обязательно соблюдение требований: сухой образец, раскаленная игла, опытный лаборант.

В лаборатории ИНОЗ РАЗ используется метод окрашивания частиц липофильным красителем. В чашки Петри добавлялся краситель Нильский красный, растворенный в н-гексане (10 мг/л). Образцы выдерживались в затемненном вытяжном шкафу до полного испарения влаги. Пробы анализировались при помощи флуоресцентного микроскопа МИКМЕД-2 ЛОМО с цифровой камерой МС-6.3 на двух длинах электромагнитных волн: 330-385 нм (ультрафиолетовое излучение) и 510—560 нм (зеленый спектр).

Для пересчета веса влажной пробы на абсолютно сухой вес 10 г донных отложений высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Проба взвешивалась до и после сушки, после чего рассчитывалась разница между влажным и сухим весом в процентах. Полученные концентрации микропластика во влажной пробе пересчитывались на сухой вес (г на кг с.в.).

Особенности пробоподготовки и обработки образцов, контроль загрязнения и контроль качества анализа

При проведении процедуры экстракции частиц микропластика из образцов грунта с помощью делительной воронки или термохимического стакана в ПластикЛаб РГГМУ проба тщательно перемешивалась (гомогенизировалась) перед помещением в воронку/стакан, а после первого этапа отстаивания снова периодически перемешивалась, иногда несколько раз (см. табл. 1). Перед сливом супернатанта стенки воронки/стакана тщательно обмывались раствором хлорида цинка (5—6 раз), весь смыв также отправлялся на конечный фильтр. После слива супернатанта вся площадь делительной воронки тщательно обмывалась профильтрованной дистиллированной водой, которая отправлялась на тот же фильтр со взвесью.

В лаборатории ИНОЗ РАН при использовании SMI-установки раствор $ZnCl_2$ добавлялся до середины верхней трубы, после чего шаровой кран перекрывался, и верхний супернатант сливался через металлическую сеть (60 мкм). Далее верхняя часть установки снималась, стенки тщательно промывались дистиллированной водой на ту же сеть. Верхняя часть установки снова помещалась на место, шаровой кран открывался и осадок повторно заливался раствором $ZnCl_2$. После повторного отстаивания осадочная жидкость над шаровым краном так же фильтровалась через сетку и смывалась в колбу с предыдущей частью образца.

Лабораторные протоколы ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН обязательно включают контроль загрязнения материалов и химических реактивов на всех этапах работы согласно принятым международным требованиям, а также использование холостых (процедурных) проб. Контроль загрязнения и контроль качества

анализа проводился в обеих лабораториях идентично. Основные этапы контроля воздушного загрязнения включают использование х/б халатов, изолирование образца от внешней среды (стаканы и установки всегда накрыты чашкой Петри или фольгой), работу в условиях чистой лаборатории [16] с ограничением доступа посторонних и тщательной уборкой рабочего места, а также установку открытых чашек Петри со смоченным чистым фильтром в рабочей зоне для коррекции итоговых результатов. Процедурные (холостые) пробы с раствором $ZnCl_2$ обрабатывались тем же способом, что и реальные пробы. Количество частиц, обнаруженных в холостых пробах, учитывалось при расчете итоговых концентраций. Все используемые реактивы и дистиллированная вода фильтровались через фильтр с ячейкой до 80 мкм. Применялась всегда стеклянная посуда, ограничивалось применение пластиковых предметов и синтетических тканей. Нейлоновый фильтр, используемый в лаборатории ПластикЛаб для смыва образца, не является помехой в исследовании, так как нити фильтра имеют постоянную толщину и под микроскопом очень хорошо отличимы от микропластика из образцов (см. рис. 2 в разделе «Результаты»). В то же время четкая видимая структура нейлонового фильтра очень удобна для подсчета частиц под микроскопом.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного эксперимента по сравнению методов экстракции контрольных полистироловых гранул и «природных» частиц микропластика из проб донных отложений в ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты сличительного эксперимента по экстракции микропластика из проб донных отложений при использовании термостакана, делительной воронки и SMI-установки

Results of intercalibration experiment on microplastic extraction from bottom sediment samples using the beaker, separation funnel and SMI-installation unit

Лаборатория	Номер пробы	Используемое оборудование	Количество извлеченных контрольных гранул, шт / %	Количество микропластика в образце (в 50 г в.в.)	Концентрация микропластика, шт/кг.с.в.
ПластикЛаб	1	Делительная воронка	19 / 95 %	22	440
	1	Термостакан	13 / 65 %	7	140
ИНОЗ	1	Термостакан	12 / 60 %	4	80
	1	SMI-установка	12 / 60 %	5	100
ПластикЛаб	2	Делительная воронка	20 / 100 %	64	1276
	2	Термостакан	15 / 75 %	10	201
ИНОЗ	2	Термостакан	10 / 50 %	1	74
	2	SMI-установка	17 / 85 %	4	296
ПластикЛаб	3	Делительная воронка	20 / 100 %	74	1488
	3	Термостакан	8 / 40 %	15	298
ИНОЗ	3	Термостакан	19 / 95 %	2	87
	3	SMI-установка	15 / 75 %	1	87

Средняя эффективность экстракции контрольных частиц микропластика с использованием термостакана составила 60 % в ПластикЛаб РГГМУ и 68,3 % — в лаборатории ИНОЗ РАН. При использовании делительной воронки процент извлеченных контрольных гранул в среднем составляет 98,3 %, а при использовании SMI-установки — 73,3%.

Этот результат отразился на количестве идентифицированных «природных» частиц микропластика, так как полученные концентрации микропластиковых частиц в донных отложениях при использовании делительной воронки или SMI-установки значительно выше, чем при использовании термохимического стакана. Так, средняя концентрация частиц «природного» микропластика, полученная путем экстрагирования в термостаканах, составила $213 \pm 79,7$ частиц на кг с.в. в ПластикЛаб РГГМУ и $80,3 \pm 6,5$ частиц на кг с.в. — в ИНОЗ РАН. Средняя концентрация частиц микропластика при использовании альтернативных устройств составила $1068 \pm 554,1$ частиц на кг с.в. для делительной воронки и $161 \pm 117,1$ частиц на кг с.в. — для SMI-установки.

Между результатами по экстракции контрольных пластиковых гранул из трех разных проб в термостакане у обеих лабораторий наблюдаются существенные различия, что может указывать на значительное влияние случайных факторов на эффективность данного метода. Здесь стоит отметить, что гранулы очень четко определяются визуально под микроскопом (см. рис. 2) без необходимости верификации каждой частицы. Таким образом, в этой части исследования обе лаборатории работали по единому протоколу, и влияние метода верификации (метод горячей иглы или метод окрашивания липофильным красителем) на результаты экстракции контрольных частиц можно исключить.

В среднем полученные данные по оценке эффективности использования термостакана для экстракции контрольных частиц микропластика у обеих лабораторий сопоставимы, что подтверждает значительные потери частиц при

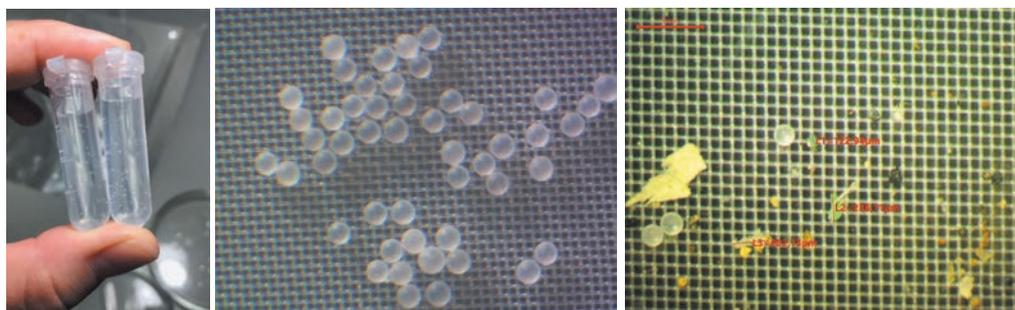


Рис. 2. Контрольные полистироловые гранулы в пробирках перед добавлением в образец грунта и на нейлоновом фильтре под микроскопом (в лаборатории ПластикЛаб), в том числе в высушенном природном образце (справа), размер ячейки фильтра 82 мкм.

Fig. 2. Reference polystyrene granules before adding to the sediment sample and on the nylon filter under microscope (in PlasticLab), with the view of dry natural sample (right), filter cell size 82 mm.

использовании данного вида посуды для отстаивания донных отложений в растворе соли.

Интересно, что выбор лабораторной посуды при плотностном разделении не сильно повлиял на распределение найденных в образце «природных» частиц микропластика по форме. Процентное соотношение волокон и фрагментов по результатам обоих экспериментов соответственно составило 86 % и 14 % в ПластикЛаб РГГМУ и 76 % и 24 % — в ИНОЗ РАН. Очевидно, это говорит о достаточной плотности используемого раствора соли, применяемого для процедуры отстаивания (в данном случае $ZnCl_2$ — 1,7—1,8 г/см³), когда большинство частиц микропластика поднимается к поверхности.

Различие в результатах оценки содержания «природного» микропластика в двух лабораториях вызвано как особенностями применяемых лабораторных протоколов (более длительное отстаивание пробы в растворе соли в лаборатории ПластикЛаб), так и различными методами полимерной идентификации частиц, когда результаты идентификации природных частиц в лаборатории ПластикЛаб оказываются выше более чем в два раза, чем в лаборатории ИНОЗ РАН при использовании одинаковой посуды (термостакана). Авторы намеренно представляют в статье эту часть исследования, делая далее упор на сравнение результатов оценки «природного» микропластика внутри каждой лаборатории (термостакан — делительная воронка, термостакан — SMI-установка). Очевидно, что сравнение результатов определения «природного» микропластика между двумя лабораториями не может быть проведено напрямую. Метод горячей иглы является распространенным и простым методом быстрой идентификации потенциальных синтетических частиц, который, с одной стороны, может недооценивать количество прозрачных частиц, а, с другой, — давать ложные положительные результаты для некоторых волокон [13]. Результаты анализа частиц в лаборатории ИНОЗ РАН при помощи флуоресцентной микроскопии при ультрафиолетовом излучении (330—385 нм) и в зеленой части спектра (510—560 нм), позволяют с большей долей вероятности утверждать, что данные частицы являются искусственными полимерами. Это следует учитывать при применении данных методов.

В ходе описанного эксперимента, как и в ходе проведенного в 2021 г. сравнительного эксперимента лабораторий региона Финского залива, несмотря на меры предосторожности, применяемые во всех лабораториях (использование стеклянной и металлической посуды, фильтрация всех жидкостей и реагентов, промывка посуды дистиллятом, использование хлопковых халатов, холостые пробы воздуха на рабочем месте и пр.) в контрольных пробах все же наблюдалась контаминация микропластиком (в первую очередь, волокнами), которую обязательно надо учитывать при подсчете общего количества микропластиковых частиц.

Проведенный эксперимент в лаборатории ПластикЛаб показал, что в сравнении с термостаканом использование делительной воронки дает лучший результат при экстрагировании контрольных частиц и «природного» микропластика из образца донных отложений. Важнейшим преимуществом использования воронки перед стаканом является возможность полного промывания использованной посуды (всей площади поверхности), что невозможно при использовании химического

стакана, когда значительная часть частиц остается на стенках и теряется при сливе супернатанта. Однако при использовании делительной воронки необходимо учитывать особенности данного вида посуды, которые могут осложнять обработку пробы грунта. Так, например, максимальная масса грунта, которую можно исследовать в воронке объемом 1000 мл составляет 100 г, так как при использовании большей массы грунта частицы осадка спрессовываются и не проходят через сливной носик. Также важен гранулометрический состав исследуемого грунта: размер частиц не должен превышать 1000 мкм, так как сливной носик не сможет пропустить гранулы большего размера. В случае крупноразмерного донного осадка можно использовать предварительное просеивание пробы через сита соответствующих размеров ячеек.

Использование SMI-установки также показало свою эффективность: при использовании термостакана для отстаивания образца в растворе соли средняя концентрация «природного» микропластика в лаборатории ИНОЗ РАН оказалась в два раза меньше. Исследования, выполненные ранее с применением данной установки другими научными группами, подтвердили эффективность метода на 95,8 % [21], а также >80 % для экстракции частиц полиэтилентерефталата и > 90 % для экстракции частиц полипропилена, полиэтилена и поливинилхлорида [25].

По результатам проведенных исследований, более высокие концентрации «природного» микропластика были зафиксированы в пробах илистого грунта (пробы № 2 и 3) при использовании делительной воронки в лаборатории ПластикЛаб РГГМУ. При использовании термостакана в обеих лабораториях не наблюдалось существенной разницы между концентрацией частиц микропластика в илистых и песчаных пробах, что также было установлено ранее в исследованиях микропластика в донных отложениях Ладожского озера [26]. При использовании SMI-установки разница между концентрациями в различных грунтах была также невелика. Таким образом, для данного исследования использование делительной воронки для плотностного отделения частиц микропластика от осадка представляется наиболее информативным методом.

Использование представленных альтернативных термостакану устройств — делительной воронки и SMI-установки имеет некоторые особенности, которые должны учитываться при работе в лаборатории. Например, при использовании воронки важен объем грунта и его гранулометрический состав, а при использовании SMI-установки необходимо учитывать ее пластиковую основу и вычитать частицы данного цвета и состава из общего количества микропластика. Рекомендовано использовать растворы солей, обладающие достаточной плотностью для выделения частиц пластика (1,7—1,8 г/см³) и при этом безопасные для окружающей среды (например, поливольфрамат натрия), а также одинаковые объемы образца и самого раствора для выделения частиц для получения сравнимых результатов.

Результаты работы подтверждают выводы, полученные в ходе сличительного эксперимента в регионе Финского залива в 2021 г., когда степень извлечения контрольных частиц из донных отложений была ниже, чем из проб воды. Тогда была показана важность нескольких важнейших методических аспектов при пробоподготовке и анализе природных образцов:

— обязательное соблюдение процедур контроля контаминации на всех этапах работы с образцами;

— важность минимизации этапов пробоподготовки, а также необходимость вымывания образца до полного его извлечения при переносе образца из одной емкости в другую.

Такое явление, как потеря частиц при увеличении этапов пробообработки, было описано ранее в [27], а в [28] подчеркивается, что недооценка количества частиц часто приводит к ошибкам, и что риск необнаружения и потери частиц в процессе обработки выше, чем риск загрязнения. При этом количество микропластика в образцах компонентов окружающей среды может быть занижено в среднем примерно на 14 % [29]. Для каждой конкретной природной матрицы (вода, донные отложения) рекомендуется выполнять тесты по извлечению частиц (контроль качества анализа) [16]. При этом обычно сложно оценить на каком именно этапе происходит искажение результата оценки содержания частиц микропластика — обработка пробы или идентификация частиц, поэтому рекомендуется анализировать образцы донных отложений в нескольких повторностях для уменьшения ошибки измерения и увеличения надежности конечной оценки.

Выводы

Результаты эксперимента по интеркалибрации методов лабораторной обработки проб донного грунта лабораториями ПластикЛаб РГГМУ и ИНОЗ РАН показали, что наименее эффективным из рассмотренных способов экстракции микропластика из среды является отстаивание грунта в термостакане, в ходе которого теряется в среднем до 40 % контрольных частиц микропластика. На основании проведенного лабораторного эксперимента и результатов, полученных ранее научными группами в регионе Финского залива и Балтийского моря, можно сделать вывод о целесообразности применения специальных видов устройств для проведения процедуры плотностного разделения, таких как, например, делительная воронка или SMI-установка для экстракции микропластика из донных отложений, которые обеспечивают:

— достаточную изоляцию образца от внешней среды (для исключения контаминации),

— эффективное извлечение супернатанта с содержащимся в ней микропластиком, исключающее потери частиц при переносе образца.

При сравнении морфологического состава определённых частиц с помощью всех перечисленных способов плотностного разделения можно сказать, что все установки, в том числе и термостакан, позволяют выделить из образца сравнимое количество как волокон, так и фрагментов, что вероятно говорит о достаточной плотности используемого раствора хлорида цинка.

Очевидно, что в отсутствие стандартов и руководящих документов по аналитической работе с образцами природной среды для определения содержания микропластика каждая лаборатория будет руководствоваться различными критериями: дешевизна и доступность оборудования, трудозатраты, возможность работы

с теми или иными устройствами и реагентами. Подбор метода пробоподготовки должен обеспечивать минимизацию загрязнения образца во время проведения исследований с одной стороны, и потери частиц — с другой. При всех существующих недостатках того или иного метода всегда должен достигаться некоторый компромисс между концентрацией реактивов, температурой выдержки и временем обработки.

Обязательны к соблюдению процедуры оценки качества (ОК) и контроля качества анализа (КК) [16], когда проводится контроль загрязнения микропластиковыми частицами на каждом этапе работы и проводятся тесты по извлечению частиц из соответствующей анализу матрицы. Пробоподготовку и лабораторный анализ необходимо проводить в условиях чистой лаборатории [16]. Чтобы улучшить сопоставимость данных разных научных групп, важно сосредоточиться на двух аспектах, которые приводят к установленным вариациям: предотвращение загрязнения пробы и снижение потерь частиц во время пробоподготовки.

Сравнение данных между различными научными группами по содержанию частиц микропластика в компонентах окружающей среды в настоящее время является крайне важной задачей для дальнейшего развития исследований в этой сфере. Для обеспечения сравнимости результатов исследований разных лабораторий, использующих разные лабораторные протоколы исследований, рекомендуется участие в межлабораторных сличительных экспериментах, которые позволяют выделить особенности использования того или иного лабораторного оборудования и оценить ошибки измерения.

Список литературы

1. Thompson R. C., Olsen Y., Mitchell R. P. et al. Lost at sea: where is all the plastic? // *Science*. 2004. Vol. 304(5672). P. 838. doi: 10.1126/science.1094559.
2. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R. C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // *Environmental Science and Technology*. 2012. Vol. 46(6). P. 3060–3075. doi: 10.1021/es2031505.
3. Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И. и др. Микропластик в морской среде: монография. М.: Научный мир, 2021. 520 с.
4. Prata J. C., Da Costa J. P., Duarte A. C., Rocha-Santos T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 110. P. 150—159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>.
5. Lusher A. L., Munno K., Hermabessiere L., Carr S. Isolation and Extraction of Microplastics from Environmental Samples: An Evaluation of Practical Approaches and Recommendations for Further Harmonization // *Applied Spectroscopy*. 2020. Vol. 74 (9). P. 1049—1065. <https://doi.org/10.1177/0003702820938993>.
6. Stock F., Reifferscheid G., Brennholt N., Kostianaia E. Pitfalls and Limitations in Microplastic Analyses. *Plastics in the Aquatic Environment. Part I. The Handbook of Environmental Chemistry*. 2022. Vol. 111. 496 p. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65465-4_654.
7. *Microplastic contamination in aquatic environments. An Emerging Matter of Environmental Urgency / Second ed.* Ed. by Eddy Y. Zeng. 2024. 448 p. ISBN 978-0-443-15332-7. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-00176-8>.
8. Ershova A. A., Frank Yu. A. Separation and purification of microplastics from environmental samples. *Analysis of Microplastics and Nanoplastics*. Ed.: Huahong Shi, Chengjun Sun. Springer, 2024. ISBN: 9780443157790 [In press].

9. Li J., Liu H., Chen J. P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // *Water research*. 2017. Vol. 137. P. 362—374. doi: 10.1016/j.watres.2017.12.056.
10. Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y., Naffrechoux E. Microplastic pollution of worldwide lakes // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 284. P. 117075. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117075.
11. Frank, Y.; Ershova, A.; Batasheva, S. et al. Microplastics in Freshwater: A Focus on the Russian Inland Waters // *Water*. 2022. Vol. 14. P. 3909. <https://doi.org/10.3390/w14233909>.
12. Yang L., Zhang Y., Kang S. et al. Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 780. P. 146546. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146546.
13. Hermsen E., Mintenig S. M., Besseling E., Koelmans A. A. Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples: A Critical Review // *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52(18). P. 10230—10240. doi: 10.1021/acs.est.8b01611.
14. Lusher A. L., Primpke S. Finding the Balance between Research and Monitoring: When Are Methods Good Enough to Understand Plastic Pollution? // *Environmental Science and Technology*. 2023. Vol. 57(15). P. 6033—6039. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06018>.
15. Primpke S., Christiansen S. H., Cowger W. et al. Critical Assessment of Analytical Methods for the Harmonized and Cost-Efficient Analysis of Microplastics // *Applied Spectroscopy*. 2020. Vol. 74(9). P. 1012—1047. <https://doi.org/10.1177/0003702820921465>.
16. Пахомова С. В., Ершова А. А., Жданов И. А., Якушев Е. В. Методы исследования загрязнения микропластиком природных вод: современное состояние и рекомендации // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (1). С. 80—120. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).5).
17. ISO/FDIS 24187 «Principles for the analysis of microplastics present in the environment» <https://www.iso.org/standard/78033.html> (дата обращения: 1.03.2024).
18. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 2021. 257 p. URL: <https://www.amap.no/documents/download/6761/inline>.
19. GESAMP Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment / Editor: Kershaw P.J. Reports and Studies 90. 2015. 96 p.
20. HELCOM BLUES Microlitter Group: Draft guidelines on monitoring of microlitter in seabed sediments in the Baltic Sea. 2022. Document 2. <https://portal.helcom.fi/meetings/HELCOM%20BLUES%20WS%203.2-2022-999/MeetingDocuments/Forms/AllItems.aspx>. (дата обращения: 1.11.2023).
21. Coppock R. L., Cole M., Lindeque P. K. et al. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments // *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 230. P. 829—837. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.017.
22. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48 // NOAA Marine Debris Program. 2015. 31 p.
23. De Witte B., Devriese L., Bekaert K. et al. Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): Comparison between commercial and wild types // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 85(1). P. 146—155. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.006>.
24. Lusher A. L., Welden N. A., Sobral P., Cole M. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates // *Anal. Methods*. 2017. Vol. 9. P. 1346—1360. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>.
25. Vermeiren P., Muñoz C., Ikejima K. Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol // *Environmental Pollution*. 2020. V. 262. P. 114298. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114298.
26. Иванова Е. В., Тихонова Д. А. Оценка содержания частиц микропластика в Ладожском озере // *Труды КарНЦ РАН. Серия Лимнология и океанология*. №6. 2022. С. 58—67. DOI: 10.17076/lim1582.
27. Dimante-Deimantovica I., Suhareva N., Barone M. et al. Hide-and-peek: Threshold values and contribution towards better understanding of recovery rate in microplastic research // *MethodsX*. 2022. Vol. 9. P. 101603. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101603>.

28. Cadiou, J.-F., Gerigny, O., Koren, Š. et al. Lessons learned from an intercalibration exercise on the quantification and characterization of microplastic particles in sediment and water samples // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 154. P. 111097. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111097>.
29. Way, C., Hudson, M. D., Williams, I. D., Langley, G. J. Evidence of underestimation in microplastic research: A meta-analysis of recovery rate studies // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 805. P. 150227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150227>.

References

1. Thompson R. C., Olsen Y., Mitchell R. P. et al. Lost at sea: where is all the plastic? *Science*. 2004; 304 (5672): 838. doi: 10.1126/science.1094559.
2. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science and Technology*. 2012; 46(6): 3060—3075. doi: 10.1021/es2031505.
3. Chubarenko I. P., Esyukova E. E., Khatmullina L. I. et al. *Mikroplastik v morskoi srede = Microplastics in the marine environment: monograph*. Moscow: Nauchnyi mir. 2021: 520 p. (In Russ.).
4. Prata J. C., Da Costa J. P., Duarte A. C., Rocha-Santos T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019; (110): 150—159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>.
5. Lusher A. L., Munno K., Hermabessiere L., Carr S. Isolation and Extraction of Microplastics from Environmental Samples: An Evaluation of Practical Approaches and Recommendations for Further Harmonization. *Applied Spectroscopy*. 2020; 74 (9): 1049—1065. <https://doi.org/10.1177/0003702820938993>.
6. Stock F., Reifferscheid G., Brennholt N., Kostianaia E. Pitfalls and Limitations in Microplastic Analyses. *Plastics in the Aquatic Environment. Part I. The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer, Cham. 2022; (111). 496 p. https://doi.org/10.1007/978-0-443-15332-7_654.
7. *Microplastic contamination in aquatic environments. An Emerging Matter of Environmental Urgency*. Second ed. Ed. by Eddy Y. Zeng. 2024: 448 p. ISBN 978-0-443-15332-7. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-00176-8>.
8. Ershova A. A., Frank Yu. A. Separation and purification of microplastics from environmental samples. *Analysis of Microplastics and Nanoplastics*. Ed. Huahong Shi, Chengjun Sun. Springer, 2024. ISBN: 9780443157790 [In press].
9. Li J., Liu H., Chen J. P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water research*. 2017; (137): 362—374. doi: 10.1016/j.watres.2017.12.056.
10. Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y., Naffrechoux E. Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environmental Pollution*. 2021; (284): 117075. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117075.
11. Frank, Y.; Ershova, A.; Batasheva, S. et al. Microplastics in Freshwater: A Focus on the Russian Inland Waters. *Water*. 2022; (14): 3909. <https://doi.org/10.3390/w14233909>
12. Yang L., Zhang Y., Kang S., Wang Z., Wu C. Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of The Total Environment*. 2021; (780): 146546. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146546.
13. Hermsen E., Mintenig S. M., Besseling E., Koelmans A. A. Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples: A Critical Review. *Environmental Science and Technology*. 2018; 52(18): 10230—10240. doi: 10.1021/acs.est.8b01611.
14. Lusher A. L., Primpke S. Finding the Balance between Research and Monitoring: When Are Methods Good Enough to Understand Plastic Pollution? *Environmental Science and Technology*. 2023; 57 (15): 6033—6039. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06018>.
15. Primpke S., Christiansen S. H., Cowger W. et al. Critical Assessment of Analytical Methods for the Harmonized and Cost-Efficient Analysis of Microplastics. *Applied Spectroscopy*. 2020; 74(9):1012—1047. <https://doi.org/10.1177/0003702820921465>.
16. Pakhomova S. V., Ershova A. A., Zhdanov I. A., Yakushev E. V. Methods of microplastic pollution research of water bodies: modern state and recommendations. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological research*. 2024; 52 (1): (80—120). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).5). (In Russ.).

17. ISO/FDIS 24187 «Principles for the analysis of microplastics present in the environment». Available at: <https://www.iso.org/standard/78033.html>
18. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 2021: 257 p. Available at: <https://www.amap.no/documents/download/6761/inline>
19. GESAMP Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment / Editor: Kershaw P.J. Reports and Studies 90. 2015: 96 p.
20. HELCOM BLUES Microlitter Group: Draft guidelines on monitoring of microlitter in seabed sediments in the Baltic Sea. Document 2. 2022. Available at: <https://portal.helcom.fi/meetings/HELCOM%20BLUES%20WS%203.2-2022-999/MeetingDocuments/Forms/AllItems.aspx>.
21. Coppock R. L., Cole M., Lindeque P. K. et al. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *Environmental Pollution*. 2017; (230): 829—837. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.017.
22. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. NOAA Marine Debris Program. 2015: 31 p.
23. De Witte B., Devriese L., Bekaert K. et al. Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): Comparison between commercial and wild types. *Marine Pollution Bulletin*. 2014; (85 (1): 146—155. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.006>.
24. Lusher A. L., Welden N. A., Sobral P., Cole M. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Anal. Methods*. 2017; (9): 1346—1360. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>.
25. Vermeiren P., Muñoz C., Ikejima K. Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol. *Environmental Pollution*. 2020; (262): 114298. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114298.
26. Ivanova E.V., Tikhonova D.A. Assessment of microplastic particle content in Ladoga Lake. *Trudy KarNC RAS = Proceedings of Karelian Science Centre RAS. Series Limnology and Oceanology*. 2022; (6): (58—67). DOI: 10.17076/lim1582. (In Russ.).
27. Dimante-Deimantovica I., Suhareva N., Barone M. et al. Hide-and-seek: Threshold values and contribution towards better understanding of recovery rate in microplastic research. *MethodsX*. 2022; (9): 101603. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101603>.
28. Cadiou J.-F., Gerigny O., Koren Š. et al. Lessons learned from an intercalibration exercise on the quantification and characterisation of microplastic particles in sediment and water samples. *Marine Pollution Bulletin*. 2020; (154): 111097. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111097>.
29. Way C., Hudson M. D., Williams I. D., Langley G. J. Evidence of underestimation in microplastic research: A meta-analysis of recovery rate studies. *Science of The Total Environment*. 2022; (805): 150227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150227>.

Сведения об авторах

Ершова Александра Александровна, канд. геогр. наук, доцент кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, заведующая Лабораторией исследования пластикового загрязнения природной среды ПластикЛаб, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, plasticlab.2019@gmail.com

Иванова Екатерина Викторовна, канд. геогр. наук, научный сотрудник, Институт озероведения РАН — Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия, spb.spt@mail.ru

Тихонова Дарья Алексеевна, научный сотрудник, Институт озероведения РАН — Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия, tdasha94@mail.ru

Макеева Ирина Николаевна, инженер, Лаборатория исследования пластикового загрязнения природной среды ПластикЛаб, Российский государственный гидрометеорологический университет, zelsl@mail.ru

Information about authors

Ershova Alexandra Alexandrovna, Ph.D. geogr. Sciences, Associate Professor of the Department of Geoecology, Environmental Management and Environmental Safety, Head of the Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, plasticlab.2019@gmail.com.

Ivanova Ekaterina Viktorovna, Ph.D. geogr. Sciences, Research Fellow, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences - St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (INOZ RAS - St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences), St. Petersburg, Russia, spb.spt@mail.ru.

Tikhonova Daria Alekseevna, researcher, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences - St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (INOZ RAS - St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences), St. Petersburg, Russia, tdasha94@mail.ru.

Makeeva Irina Nikolaevna, engineer, Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab, Russian State Hydrometeorological University, zelsl@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.05.2024

Принята в печать после доработки 02.09.2024

The article was received on 14.05.2024

The article was accepted after revision on 02.09.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 542—559.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):542—559.

Научная статья
УДК [556.535.8+556.555.8]:[502.175:594]
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-542-559

**О возможности мониторинга загрязнения
пресноводных водоёмов Северо-Запада России
с использованием нового биоиндикатора —
переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus***

***Николай Николаевич Камардин^{1, 2}, Татьяна Владимировна Кузнецова¹,
Александра Борисовна Манвелова¹***

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
nik-kamardin@yandex.ru

Аннотация. Проведено комплексное экологическое исследование трех локаций на реке Луге с использованием нового биоиндикатора — переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus*. Выполнен анализ качества вод, оценено содержание тяжелых металлов в донных отложениях и тканях моллюсков. Изучены реакции кардиосистемы моллюсков на реверсивное изменение температуры воды как функциональную нагрузку для выявления различий в адаптивных возможностях моллюсков из разных локаций. Обнаружены достоверные различия в реакциях кардиосистемы на нагревание и охлаждение между группами моллюсков из разных локаций. Показано, что реакции кардиосистемы *V. viviparus* могут применяться в оценке адаптивных возможностей моллюсков и, следовательно, характеризовать экологического состояние водных экосистем их обитания.

Ключевые слова: экологическое состояние водоема, экологический индикатор, моллюск-живородка, кардиоактивность, река Луга.

Благодарности: Данное исследование выполнено в рамках НПЦ «Научные основы оценки здоровья экосистем Северо-Запада России и предупреждения угроз экологической безопасности (FFZF-2022-0011)».

Для цитирования: Камардин Н. Н., Кузнецова Т. В., Манвелова А. Б. О возможности мониторинга загрязнения пресноводных водоёмов Северо-Запада России с использованием нового биоиндикатора — переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 542—559. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-542-559.

Original article

On the possibility of monitoring pollution of freshwater bodies of North-West Russia using a new bioindicator — the prosobranch mollusk *Viviparus viviparus*

Nikolai N. Kamardin^{1, 2}, *Tatiana V. Kuznetsova*¹,
*Alexandra B. Manvelova*¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russian Federation

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation, nik-kamardin@yandex.ru

Summary. Natural water bodies of the Leningrad Region, and in particular in the Luga River basin, are currently experiencing significant anthropogenic pressure associated with the active development of the territories of its catchment basin. As a result of large-scale works, the Luga River undergoes significant changes in hydrological (dredging works in the mouth of the river, reclamation works in the port of Ust-Luga) indicators, physical, chemical and ecological characteristics of water masses. A comprehensive environmental assessment of three sites on the Luga River (Luga and Kingiseppsky District) was carried out. It includes physicochemical analysis of water quality, the content of heavy metals in sediments and tissues of local mollusk *Viviparus viviparus*, and the reactions of the mollusk cardiac system to a reversible change in water temperature as a functional load to identify differences between mollusks from study sites. Differences in the content of heavy metals in sediments of study locations were revealed as well as in environmental water quality. Using method of critical temperature maximum significant differences were also found in cardiac responses to heating and cooling between groups of mollusks. The results indicate a healthy heart and a clear regulation of its work by the circuit of the autonomic nervous system in mollusks caught near the village Preobrazhenka and depressed physiological state of mollusks from the location of the beach of the city of Luga. The study indicates the vulnerability of viviparid mollusks to the pollution of their habitats with heavy metals. It has been shown that bivalve mollusk *Viviparus viviparus* is a good bioindicator of the ecological state of freshwater bodies and watercourses in the North-Western region of Russia. The reactions of the cardiac system can be used to assess the adaptive capabilities of mollusks and, therefore, characterize the state of aquatic ecosystems in their habitat.

Keywords: ecological state assessment, ecological indicator, mollusk, cardiac activity, the Luga River.

Acknowledgments: This study was carried out within the framework of the Scientific and Practical Center “Scientific Foundations for Assessing the Health of Ecosystems in North-West Russia and Preventing Threats to Environmental Safety (FFZF-2022-0011)”.

For citation: Kamardin N. N., Kuznetsova T. V., Manvelova A. B. On the possibility of monitoring pollution of freshwater bodies of North-West Russia using a new bioindicator — the prosobranch mollusk *Viviparus viviparus* // *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):542—559. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-542-559.

Введение

Природные водные объекты Ленинградской области, в том числе в бассейне реки Луги, в настоящее время испытывают существенную антропогенную нагрузку, связанную с активным освоением территорий ее водосборного бассейна. Развивается строительство объектов инфраструктуры, строящихся портовых сооружений (г. Усть-Луга, универсальный погрузочный комплекс «LugaPort», многопрофильный терминал «Ультрамар»). Продолжается строительство крупнейшего в Европе мусороперерабатывающего завода в Кингисеппском районе и

т. д. Существенное влияние на экологическое состояние реки оказывают и уже действующие многие годы промышленные объекты, основным из которых является предприятие ООО «ПГ» «Фосфорит» — один из ведущих производителей фосфорных удобрений и кормовых фосфатов на северо-западе России, а также фосфоритной муки, серной и фосфорной кислот. В результате этих масштабных работ река Луга претерпевает значительные изменения гидрологических показателей (дноуглубительные работы в устьевой части реки, намывные работы в порту Усть-Луга), физико-химических и экологических характеристик водных масс. Предприятиями, осуществляющими сброс загрязненных сточных вод в поверхностные воды в бассейне реки Луга, являются также АО «Кингисеппский водоканал», ГУП «Леноблводоканал», ОАО «Коммунальные системы Гатчинского района» (пос. Сиверский, Вырица, Рождествено и др.), а также предприятия пищевой, металлообрабатывающей промышленности и др. Значительные площади территории заняты сельскохозяйственными угодьями, что обуславливает повышенный сток биогенных элементов. Все это оказывает и будет оказывать влияние на биологические индикаторы состояния водной экосистемы реки Луги.

Известно, что гидробионты подвержены различным стрессам в своей среде обитания, которые могут отражаться на их адаптивных возможностях, рассматриваемых как мера «здоровья» животного. Например, температура воды, ее жесткость, доступность кислорода, концентрации загрязняющих веществ в воде, хищничество, конкуренция — все эти факторы могут оказывать негативное влияние на моллюсков [1—5].

Авторами предложено использовать переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* в качестве биоиндикатора экологического состояния пресноводных объектов. У экзотермных организмов физиологические функции чувствительны к изменению температуры окружающей среды и тесно связаны с устойчивостью организма к температурным воздействиям, которые, в свою очередь, контролируют скорость большинства метаболических процессов. Механизмы регуляции различных физиологических показателей живых организмов при потеплении климата активно обсуждаются в современной научной литературе (например, [6]).

В последнее время биотехнологии достигли значительных успехов в анализе связи изменений, происходящих в окружающей среде, с геномом. Например, были проведены полнотранскриптомные исследования красного морского ушка (*Haliotis rufescens*) для трех экологически различающихся регионов и идентифицированы некоторые локусы, связанные с реакцией на тепловой стресс [7]. Оказалось, что семейство генов белка теплового шока HSP 70 тесно связано с тепловыми адаптациями у моллюсков [8]. Температура точки перелома Аррениуса (ТПА) в сердечной деятельности часто используется в качестве индикатора термоустойчивости у крабов (*Petrolisthes*) [9], морских улиток (*genus Tegula*) [10], морских блюдечек (*Cellana toreuma*) [11, 12], гребешка [13] и морского ушка [14, 15].

Температура является основной переменной, контролирующей метаболизм экзотермных животных. У брюхоногих моллюсков способность поддерживать нормальный аэробный обмен при повышенных температурах воды во многом зависит от функции сердца и эффективности дыхания. По результатам

секвенирования РНК, обнаружен ген MYL4 (ген короткой цепи миозина), уровень которого снижается при повреждении сердца человека при тепловых воздействиях [16]. Показано, что у термочувствительных моллюсков максимальная частота сердечных сокращений ($ЧСС_{max}$) была ниже, чем ЧСС у термоустойчивых особей при той же температуре. Быстрая реакция белков теплового шока HSP на тепловой стресс является важной частью защитного механизма моллюсков. В термоустойчивых клетках это взаимодействие может повышать термоустойчивость белков и ускорять восстановление их после теплового повреждения [17—19]. Тепловой стресс может привести к окислительному стрессу в виде образования активных форм кислорода. Несколько генов белков (включая каталазу, супероксиддисмутазу, пероксиредоксин), связанных с антиоксидантной системой, играют важную роль, обеспечивая выживаемость организма при тепловом стрессе [20]. При анализе теплового стресса важно также учитывать активную роль нервной системы, поскольку температура влияет на работу нервной системы моллюска (ускоряет передачу сигналов между нервными клетками и скорость проведения по аксонам), контролирующей сердечную и дыхательную активность, что, в свою очередь, приводит к изменениям частоты сердцебиения и дыхания [21—23]. Реакция сердечной системы, активизация многих генов белков HSP и антиоксидантной системы (термоустойчивая реакция) является защитным механизмом, позволяющим организмам справляться с изменениями состояния окружающей среды. Так, величина температурного максимума (T_{max}) считается надежным показателем не только тепловой предпочтительности водных организмов, но и общего функционального состояния животного [6].

Ранее предложено использовать определение уровня терморезистентности у двусторчатого пресноводного моллюска *Unio pictorum* по критерию критического температурного максимума, используя неинвазивный метод регистрации и on-line анализа кардиоактивности моллюсков [24]. Была выявлена поведенческая реакция — замыкание раковины моллюсками, коррелирующая с физиологической реакцией (резкое снижение величины ЧСС в момент наступления теплового шока, определяемого методом критического температурного максимума) [6].

Цель настоящей работы состоит в изучении возможности использования скорости прироста и скорости снижения ЧСС у *V. viviparus* при реверсивном изменении температуры воды для оценки адаптивных возможностей моллюсков к изменениям показателей окружающей среды. Если моллюски из разных мест обитания имеют различные реакции кардиосистемы на T_{max} , то это может свидетельствовать о различиях в их адаптациях к экстремальным изменениям в среде обитания. Достоверные различия в реакции ЧСС на максимально допустимую величину температуры T_{max} между моллюсками из разных акваторий могут указывать на различное экологическое состояние акваторий, в которых обитают эти организмы.

Материалы и методы исследования

Река Луга — самая протяженная река Ленинградской области (353 км). Минимальная ширина реки в среднем течении составляет 20 м, максимальная (ближе

к устьевому участку) — до 350 м. Минимальная глубина — 1,5 м, а максимальная — 8 м. В весенний период идет перераспределение стока реки в устьевой зоне и через р. Россонь часть весенних половодных вод попадает в р. Нарву. Направление течения р. Луги постоянно с юго-востока на северо-запад. Русло р. Луги сложное, непрямолинейное, слегка приближенное к параболической форме. Средние скорости течения воды на стрежне реки колеблются от 0,05 м/сек при малых расходах воды до 0,54 м/сек в период весенней большой водности.

Карта мест исследования в бассейне р. Луги (окрестности г. Луги и устьевой участок р. Луги) представлена на рис. 1. Изучаемые локации на р. Луге были выбраны по наличию в них устойчивых популяций моллюсков-вживипарид.

В полевых условиях определялась температура воды, pH, жесткость, растворенный кислород в воде соответствующими приборами (Оксиметр MV600 PRO, Smartsensors pH метр для воды цифровой) и вносилась в протокол. Данные по основным физико-химическим показателям качества природных вод реки Луги по изучаемым локациям, приближенным к постам наблюдения и ФГБУ «Северо-Западное УГМС» [25] за последние три года наблюдений, обобщены и приведены в разделе «Результаты исследований».

1. Физиологические методы определения функционального состояния моллюсков

Взрослых особей переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* собирали на мелководье реки Луги около трёх населенных пунктов: в черте г. Луга (городской пляж), п.г.т. Толмачево и дер. Преображенка в начале сентября 2023 г. Вместе с небольшим количеством природной воды моллюсков доставляли в изотермных пакетах в лабораторию. После трехдневной акклиматизации к лабораторным условиям (температура воздуха 18—20 °С) у нескольких моллюсков одновременно регистрировали ЧСС при реверсивном изменении температуры природной воды в аквариуме. Для этого использовали небольшую пластмассовую кювету объёмом 800 мл с укрепленным электронагревателем 800 Вт и термометром для измерения температуры воды. Скорость нагревания воды в экспериментальной кювете составляла 1,5 °/мин. Охлаждение воды достигалось добавлением кубиков льда. ЧСС записывали в режиме on-line, используя оригинальный неинвазивный оптоволоконный метод регистрации кардиоактивности [26]. Специальная авторская программа “VarPulse” позволяла визуализировать форму кардиопульсов и вычислять плавающую среднюю ЧСС в выборке из 50 кардиоинтервалов. Полученные значения сохраняли в памяти ПК в виде файлов текстового формата (TXT).

2. Аналитические методы анализа донных отложений

Донные отложения для анализа отбирались по стандартной процедуре в местах обитания моллюсков-вживипарид. Анализ проб из изучаемых локаций на содержание некоторых тяжелых металлов (ТМ) проводился в сертифицированном Региональном аналитическом центре «Механобр аналит инжиниринг» (Санкт-Петербург, Россия) атомно-эмиссионным методом с индукционно связанной плазмой на атомно-эмиссионном спектрометре ICP7200duo (США) с двумя повторениями. Погрешность измерения составляла не более 10 %.

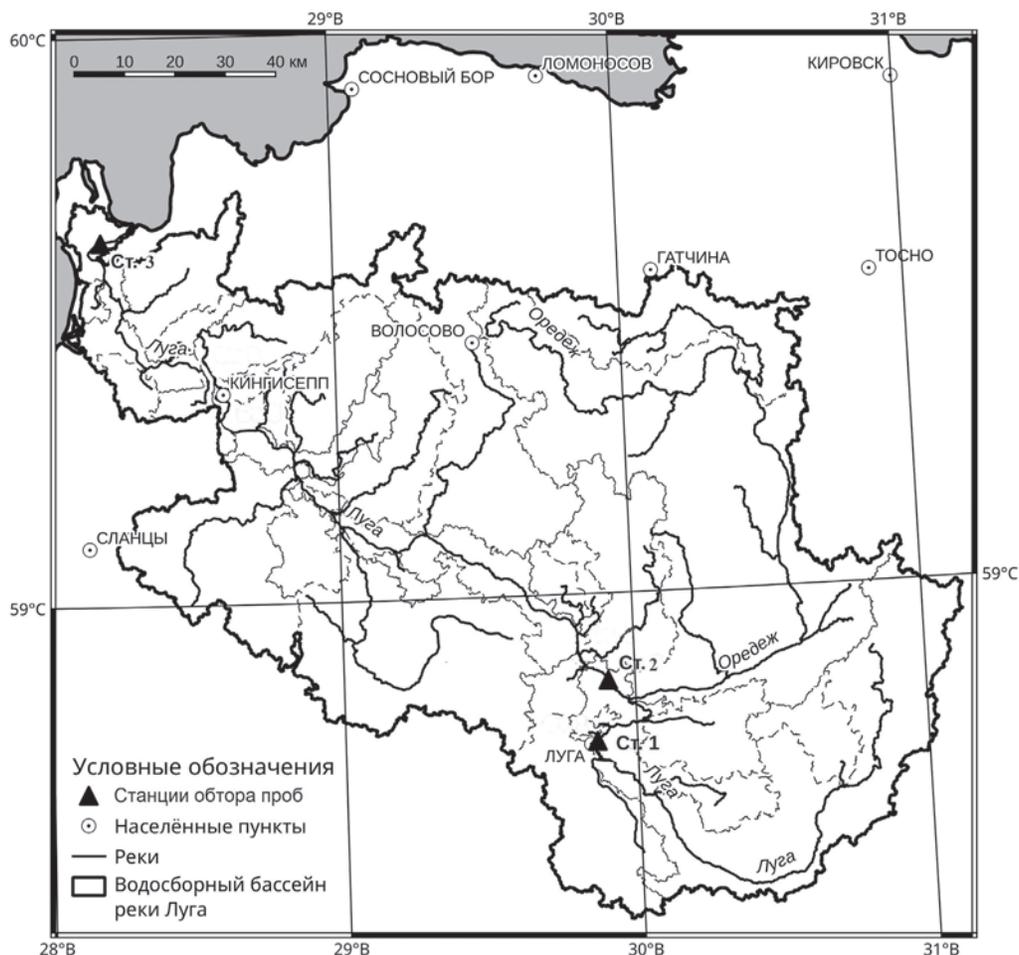


Рис. 1. Карта мест отбора моллюсков, донных отложений и воды на реке Луге (ст. 1 — пляж г. Луги), Толмачево (ст. 2) и в устьевой части реки Луга (ст. 3 — дер. Преображенка). Изучаемые локации отмечены черными треугольниками.

Fig. 1. Map of sampling sites of mollusks, sediments and water on the Luga River (st. 1 — Luga beach), Tolmachevo (st. 2) and at the mouth of the Luga River (st. 3 — Preobrazhenka village). The studied locations are marked with dark triangles.

Аналогично для анализа содержания ТМ из тех же локаций были отобраны моллюски-вивипариды 3 лет. Образцы раковин и мягких тканей (тотально) были высушены в течение двух дней при температуре 24 °С, перетерты в агатовой ступке до мелкой пыли, просеяны через фильтр в 1 мм и переданы для анализа в лабораторию, указанную выше.

3. Статистическая обработка данных

Данные о ЧСС моллюсков *Viviparus viviparus*, собранных из различных локаций р. Луги, транспортировали в программный пакет *Excel*, где для полученных кривых изменения ЧСС при возрастании и снижении температуры в экспериментальной камере строили графики изменения ЧСС, вычисляли уравнения скорости изменения ЧСС. Полученные значения скорости возрастания и снижения обрабатывались статистически с помощью программы *Prizma 6.0*. Для средних арифметических значений вычислялась ошибка выборочной средней (*SEM*), достоверные различия по *t*-критерию Стьюдента с коррекцией Уэлча и по непараметрическому критерию Фарадея. Различия считались достоверными (значимыми) при $p > 0,95$.

Результаты исследований

Моллюски вида *Viviparus viviparus* (Mollusca, Gastropoda) собирались вручную на мелководье р. Луги в Ленинградской области. Были использованы моллюски, собранные в разных локациях: первая группа была собрана на песчаном городском пляже г. Луги, вторая — выше пос. Толмачево и третья выше деревни Преображенка, выше впадения р. Выбья, в 11 км от Усть-Луги. После трехдневной акклимации к лабораторным условиям у моллюсков регистрировали ЧСС при реверсивном изменении температуры воды. Скорость изменения ЧСС моллюсков определяли из уравнения линии тренда ЧСС, полученного в программе *Excel*.

Известно, что температура воды оказывает влияние на сердечный ритм моллюсков. При быстром нагревании воды в экспериментальном аквариуме с моллюсками с 15 до 55 °С моллюски продолжают оставаться в активном состоянии и увеличивают ЧСС с 18 до 60 уд/мин. После достижения ЧСС_{max}, отслеживаемой по началу падения ЧСС, вслед за достижением максимальных значений, происходило выключение нагревателя и добавлялся лед, что приводило к снижению ЧСС в течение примерно двух часов. На рис. 2 представлен типичный пример изменения ЧСС моллюска из локации дер. Преображенка при вариации температуры воды.

При повышении температуры воды с постоянной скоростью 1,5 °/мин наблюдалось увеличение ЧСС до определенного момента (ЧСС_{max}), после которого ЧСС начинала снижаться. Максимальное значение температуры воды (T_{max}), после которого начинается снижение ЧСС у моллюсков, было принято в качестве маркера их термоустойчивости.

Проведенные эксперименты показали, что моллюски, собранные из трех разных локаций: I группа — моллюски с пляжа г. Луги, II — выше п.г.т. Толмачева, III из локации вблизи дер. Преображенка, по течению реки Луги отличаются по средней величине ЧСС при T_{max} (т.е. по термоустойчивости). Так, в I-ой группе ЧСС было равно $36,9 \pm 2,5$ уд/мин при T_{max} 29,5 °С, во II-группе — $48,3 \pm 3,7$ уд/мин при T_{max} 36,4 °С и в III — $53,0 \pm 7,4$ уд/мин при T_{max} 41,5 °С. Полученные величины ЧСС для локаций в черте г. Луги и для локаций у деревни Преображенки (Кингисеппского района) различаются по непараметрическому критерию Фарадея (*F*-тест) ($p > 95\%$), по непарному *t*-критерию с коррекцией по Уэлчу (*t*-test Student with Welch's correction). Данные представлены на рис. 3.

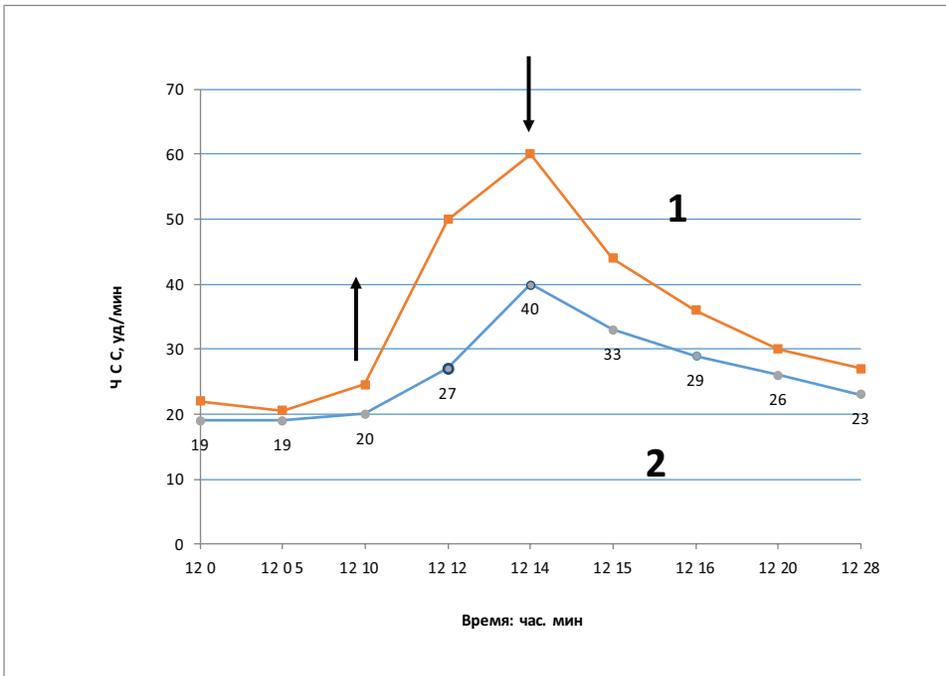


Рис. 2. Изменение ЧСС *Viviparus viviparus* при последовательном нагревании и охлаждении воды у моллюсков из локации дер. Преображенка. Моменты начала изменения температуры указаны стрелками. 1 — ЧСС, 2 — температура.

Fig. 2. Changes in the heart rate of *Viviparus viviparus* when water is sequentially heated and cooled in mollusks from the village of Preobrazhenka. The moments of the beginning of the temperature change are indicated by arrows. 1 — HR, 2 — temperature.

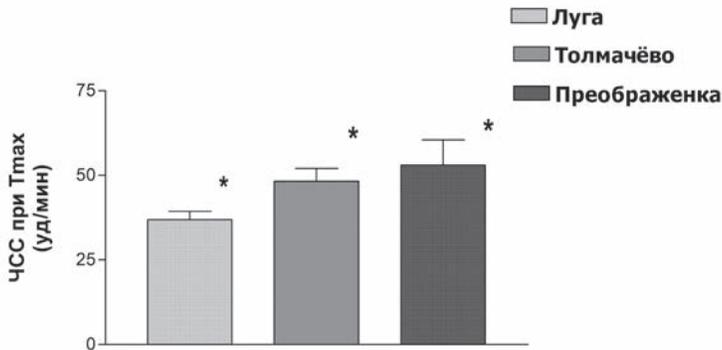


Рис. 3. ЧСС при T_{max} (терморезистентности) для моллюсков из 3-х разных локаций по течению реки Луги. Достоверность различий при $p > 0,95$ указана звездочкой *.

Fig. 3. Heart rate at T_{max} (thermal resistance) for mollusks from 3 different study locations along the Luga River. Significance differences at $p > 0,95$ is indicated *.

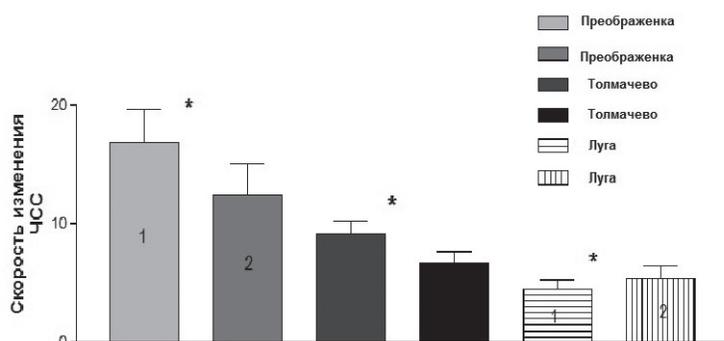


Рис. 4. Скорости прироста (1) и скорости снижения (2) сердечного ритма моллюсков из 3-х локаций по течению р. Луги. 1 и 2 — скорости нарастания и скорости снижения ЧСС в процессе нагрева и охлаждения соответственно. Доверительная вероятность различий значений между станциями при $p > 0,95$ отмечена звездочкой (*). Вертикальные линии на гистограмме — значения ошибки среднего.

Fig. 4. Rates of increase (1) and decrease (2) in the heart rate of mollusks from 3 study locations along the river Luga. 1 — rate of increase and 2 — rate of decrease in heart rate during heating and cooling respectively. The significance of differences in values between stations at $p > 0,95$ is marked with an asterisk (*). The vertical bars on the histogram are the errors of the mean.

В то же время скорость нарастания ЧСС значительно различалась для этих групп: для I-ой группы — $4,4 \pm 0,8$, для II-ой группы — $9,1 \pm 1,6$ и для III-ей группы — $16,7 \pm 4,1$ с доверительной вероятностью $p > 0,95$ по непарному t -критерию с коррекцией по Уэлчу (t -test with Welch's correction). На графиках представлены данные по скорости изменения ЧСС для моллюсков из изучаемых локаций (рис. 4).

Тренд скорости прироста и скорости снижения сердечного ритма вместе с анализом хода изменения температуры воды позволяет оценить адаптивные возможности моллюска к изменениям окружающей среды и общее здоровье животного. Во время кратковременного нагревания до T_{max} сердечная активность моллюска обычно повышается. Однако по достижению T_{max} ЧСС понижается, а при последующем охлаждении происходит снижение ЧСС. Процесс может варьироваться, что зависит от индивидуальной терморезистентности животного. Если моллюск имеет высокую устойчивость и обладает способностью быстро восстанавливаться после нагревания, то ЧСС может вернуться к исходным значениям или даже стать ниже нормы в результате охлаждения. Это свидетельствует о способности моллюска поддерживать нормальное функционирование своей сердечной системы даже после теплового шока.

Если моллюск имеет низкий порог терморезистентности или страдает от повреждений вследствие нагревания, ЧСС может не восстановиться полностью или оставаться повышенной даже при охлаждении. Это может указывать на нарушение сердечной функции и негативное влияние нагревания на организм моллюска,

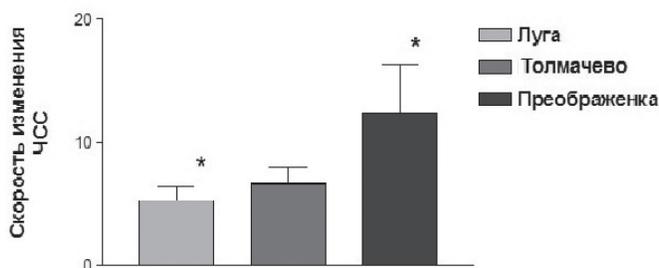


Рис. 5. Скорости снижения сердечного ритма моллюсков из трех локаций р. Луги при охлаждении. Обозначения как на рис. 4

Fig. 5. Decrease in the heart rate of mollusks from 3 study sites on the Luga River under cooling. Designations as in Fig. 4.

который испытывал функциональное напряжение вследствие обитания в неблагоприятных условиях существования, что требовало напряжения основных функциональных систем организма моллюска. В опытах с *Viviparus viviparus* скорость снижения ЧСС достоверно отличалась для этих групп: для I-ой группы — $5,39 \pm 1,1$, для II-ой группы — $6,6 \pm 0,9$ и для III-ей группы — $12,3 \pm 2,6$ по критерию Фарадея для непарных дисперсий *F*-тест при $p > 0,95$ (рис. 5).

Результаты косвенно указывают на термоустойчивость за счет включения молекулярных защитных механизмов (белков HSP и противодействию окислительному стрессу), а также четкую регуляцию его работы контуром автономной нервной системы у моллюсков, выловленных в районе дер. Преображенка. Такая же картина наблюдается при охлаждении моллюсков до комнатной температуры 22 °С для данной группы, что свидетельствует о хорошем физиологическом состоянии (здоровье) моллюсков и может характеризовать этот биотоп как относительно здоровый по сравнению с экологической обстановкой в районе городского пляжа г. Луги.

По данным мониторинга качества вод в разных створах реки Луги, класс вод в изучаемых створах за период 2020—2022 гг. колеблется от 3 «а» до 3 «б», т. е. классифицируется как «загрязненные» и «очень загрязненные» (РД 52.24.643-2002). Данные по основным физико-химическим показателям качества природных вод реки Луги по изучаемым локациям, приближенным к постам наблюдения ФГБУ «Северо-Западное УГМС» за последние три года наблюдений, обобщены и приведены ниже.

В полевых условиях в каждой из трех изучаемых локаций реки Луги было проведено измерение некоторых характеристик поверхностных вод. Результаты представлены в табл. 1.

Измерения растворенного кислорода в воде на пляже г. Луги показали самые низкие значения по сравнению с другими локациями (табл. 1). Высокие показатели рН выше р. Выбья в деревне Преображенка (10,6 км до устья реки Луги) могут быть объяснены илистыми отложениями, свойственными устьевым зонам

рек. Данные по основным физико-химическим показателям качества природных вод в створах реки Луги представлены в табл. 2.

Таблица 1

Физико-химические показатели речных вод в изучаемых локациях реки Луги
Common characteristics of the surface waters in the studied locations of the Luga River

Место расположения створа на р. Луга	<i>pH</i>	Растворенный кислород	$T_{\text{воды}}^{\circ\text{C}}$	Жесткость, Среднее
	2023 г.	2023 г.	2023 г.	2023 г.
В черте г. Луга (222 км от устья)	7,1	5,3	23,7	3,75
Выше пгт Толмачево (187 км от устья)	7,2	8,1	21,9	4,06
Выше деревни Преображенка (10,6 км от устья)	8,1	12,0	24,6	4,04

Таблица 2

Основные гидрохимические показатели воды в исследуемых локациях р. Луги [25]
Basic hydrochemical parameters of water in the studied locations on the Luga River [25]

Показатель	Единицы измерения	В черте города Луга	Выше пгт Толмачево	Преображенка
Взвешенные вещества	мг/дм ³	7,39	7,61	2,51
Растворённый кислород	мг/дм ³	6,09	7,09	9,04
ХПК	мг/дм ³	34,6	34,5	35,05
БПК ₅	мг/дм ³	1,17	1,19	1,48
NO ₂ (по N)	мг/дм ³	0,049	0,034	0,030
NO ₃ (по N)	мг/дм ³	0,57	0,45	0,48
Фосфаты (P)	мг/дм ³	0,024	0,017	0,016
Железо общее	мг/дм ³	0,093	0,18	0,36
Медь	мкг/дм ³	8,29	7,29	3,63
Свинец	мкг/дм ³	0,086	0,23	0,16
Кадмий	мкг/дм ³	0,32	0,35	0,37
Марганец	мкг/дм ³	2,54	3,02	20,46

Примечание: данные по постам в черте г. Луга и выше Толмачево за период 2020—2022 гг., по посту в д. Преображенка — 2020—2021 гг.

Содержание некоторых тяжелых металлов в донных отложениях и тканях моллюсков

Для изучения экологической обстановки в трех изучаемых локациях реки Луги были проведены аналитические исследования донных отложений на содержание тяжелых металлов (табл. 3).

Результаты содержания некоторых биологически важных ТМ в моллюсках (раковины и мягкие ткани) моллюсков-вивипарид из локации пляж реки Луги в черте города представлены в табл. 4.

Таблица 3

Содержание некоторых тяжелых металлов
в донных отложениях (мкг/г) исследуемых станций на реке Луге
Content of some heavy metals in bottom sediments ($\mu\text{g/g}$, dry weight)
of the study locations of the Luga River

Станция наблюдения	Pb	Cu	Zn	Cd
Выше д. Преображенка	8,02	2,59	8,74	0,047
В черте г. Луга	8,56	4,6	10,6	0,09
Выше пгт Толмачево	4,16	2,09	9,2	0,034

Таблица 4

Содержание некоторых тяжелых металлов
в моллюсках *Viviparus viviparus* (мкг/г, сух. веса) в локации пляж г. Луги
Content of some heavy metals
in the mollusks *Viviparus viviparus* ($\mu\text{g/g}$, dry weight) in the Luga

Металлы	Моллюски <i>Viviparus</i>	BCF (донные отложения) городской пляж г. Луги
Pb	7,3	2,2
Zn	100	10
Cu	46,4	9,8
Ni	1,7	0,6
Cd	0,14	1,5

Известно, что моллюски способны накапливать без заметного вреда для своего физиологического состояния тяжелые металлы из окружающей среды в концентрациях, часто во много раз превышающих исходные в воде или в донных отложениях. Особенно это касается необходимых для жизнедеятельности моллюсков микроэлементов Cu, Zn, Fe. Подобное наблюдается у *Viviparus viviparus* особенно в акватории р. Луги (городской пляж) в районе одноименного города, где коэффициент накопления в тканях моллюсков был высок для Zn и Cu. Кроме того, в тканях моллюсков в акватории города Луги обнаружены антропогенные металлы Cd, Hg в концентрациях, превосходящих в других исследованных локациях. Таким образом, по содержанию тяжелых металлов в седиментах и тканях моллюсков станция городской пляж г. Луги выделяется среди остальных станций мониторинга.

По данным Северо-Западного Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, качество природных вод реки Луги на всем ее протяжении оценивается как 3 «а» и 3 «б» («загрязненные» и «очень загрязненные»). Обширный водосборный бассейн реки Луги развивается в тесной взаимосвязи физико-географических условий территории и ее активным хозяйственным использованием, особенно в последнее десятилетие. Исследования позволили выявить различия в основных гидрохимических показателях поверхностных вод в трех изученных локациях на реке Луге, а также в ответных реакциях моллюсков из этих локаций на изменение температуры среды. Результаты показали большую

терморезистентность моллюсков, выловленных в районе деревни Преображенка (устьевая часть реки Луги), что свидетельствует об их высоких адаптивных возможностях к изменению условий среды. Достоверные различия в реакции ЧСС на максимально допустимую величину температуры T_{\max} между моллюсками из разных акваторий их обитания могут, на наш взгляд, указывать на различное экологическое состояние этих акваторий. Реакция ЧСС (термоустойчивая реакция), как положительная, так и отрицательная, является защитным механизмом, позволяющим организмам справляться с изменениями температуры окружающей среды. Падение термоустойчивости моллюсков, как известно, отражает нарушения в системе защитных белков клетки – белков теплового шока. Эта система изучена на человеке, когда повышение температуры тела вызывает увеличение ЧСС, секрецию гормонов и повышение внутриклеточной концентрации белков теплового шока (HSP75) [27]. Очевидно, она сохраняет свою эффективность у моллюсков из чистых акваторий обитания и нарушается в урбанизированных, подвергшихся антропогенному воздействию [16].

Повышение сердечного ритма у *Viviparus viviparus* является защитной реакцией на стрессовые ситуации, и оно отражает изменения факторов окружающей среды, запускающие другие защитные системы организма. Например, показано, что моллюск *Viviparus contectus* может увеличивать скорость фильтрации воды и увеличивать скорость дыхания при повышении температуры окружающей среды [23]. Дыхание и работа сердечной системы у моллюсков регулируются мотонейронами ЦНС и автономным контуром регуляции [21].

Скорость прироста и скорость снижения сердечного ритма *V. viviparus* могут использоваться как показатели здоровья моллюска, особенно в ходе его адаптации при изменении температуры среды. Такие характеристики уточняют данные о температурной точке перелома Аррениуса (ТПА) в сердечной активности, а именно: частоте сердцебиений и амплитуде сокращений [14, 28]. Эти показатели могут предоставить информацию об адаптивности сердца моллюска к изменениям условий окружающей среды. Повышение температуры снижает растворимость кислорода в воде и повышает скорость метаболизма. Это требует усиленной прокачки гемолимфы, которая зависит от сократительной активности сердца — ЧСС. Тяжелые металлы, такие как Pb, Cd и Hg, могут иметь токсическое воздействие на организмы [29] и вызывать различные патологические изменения, включая нарушение сердечной деятельности у разных животных, в частности, у моллюсков. Так, обнаружено, что высокая концентрация Cd в воде оказывает негативное влияние на сердечную активность моллюска *Limecola baltica* [30]. У моллюсков, находившихся в воде с повышенным содержанием этого металла, наблюдались нарушения ритма сердца и другие патологические изменения сердца. Результаты исследований свидетельствуют об уязвимости моллюсков-випарид к загрязнению их местообитания тяжелыми металлами.

Выводы

В работе показано, что переднежаберный моллюск *Viviparus viviparus* может служить объективным биоиндикатором экологического состояния пресноводных

водоемов и водотоков. Исследование позволило выявить различия в ответах кардиосистемы моллюсков-вивипарид из разных локаций реки Луги при температурных воздействиях. Выявлено различное накопление ТМ в донных отложениях и тканях моллюсков из локаций исследования. Данные могут послужить базовыми для дальнейших сравнительных исследований в области экологической безопасности в активно промышленно развивающемся регионе Ленинградской области.

Показано, что использование в качестве биоиндикаторов состояния водной экосистемы значений скорости прироста и скорости снижения сердечного ритма в зависимости от температуры воды поможет точнее оценить экологическое состояние водных объектов, а местные брюхоногие моллюски-вивипариды могут быть удобными индикаторами при диагностике состояния мест их обитания. Для корректной оценки экологического состояния водной экосистемы и его биотической составляющей (ключевые виды моллюсков) необходимо проводить комплексное исследование, включающее не только измерение сердечного ритма, но и анализ других физиологических и морфологических параметров, указывающих на альтерации, связанные с неблагоприятными изменениями в окружающей среде. Только такой подход позволит сделать достоверные выводы о состоянии моллюска и его адаптациях к окружающим условиям, а также оценить состояние (здоровье) водной экосистемы обитания этих моллюсков.

Работа по регистрации кардиоактивности моллюсков выполнена на оборудовании Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности».

Список литературы

1. Widdows J., Donkin P. Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. In: Gosling E. (eds). The mussel *Mytilus*: ecology, physiology, genetics and aquaculture. 1992. Elsevier. Amsterdam. P. 383—424.
2. Немова Н. Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 168 с.
3. Фокина Н. Н., Нефедова З. А., Немова Н. Н. Липидный состав мидий *Mytilus edulis* L. Белого моря. Влияние некоторых факторов среды обитания. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 243 с.
4. Моисеенко Т. И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // Геохимия. 2019. Т. 64. № 7. С. 675—688. doi: 10.31857/S0016-7525647675-688.
5. Михайлов Р. А. Особенности пространственного распределения *Viviparus (Viviparus viviparus)* (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) равнинной реки Нижней Волги // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2020. Vol. 5(3). P. 1—10. doi: 10.21685/2500-0578-2020-3-1.
6. Somero G. N. The physiology of climate change: How potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers’ // J. Exp. Biol. 2010. Vol. 213. No. 6. P. 912—920.
7. De Wit P., Palumbi S.R. Transcriptome-wide polymorphisms of red abalone (*Haliotis rufescens*) reveal patterns of gene flow and local adaptation // Molecular Ecology. 2013. Vol. 22. No. 11. P. 2884—2897. doi: 10.1111/mec.12081.
8. De Wit P., Rogers-Bennett L., Kudela R.M. et al. Forensic genomics as a novel tool for identifying the causes of mass mortality events // Nature Communications. 2014. Vol. 5. P. 3652. doi: 10.1038/ncomms4652.
9. Stillman J. H., Somero G. N. Adaptation to temperature stress and aerial exposure in congeneric species of intertidal porcelain crabs (genus *Petrolisthes*): correlation of physiology, biochemistry and morphology with vertical distribution // The Journal of Experimental Biology. 1996. Vol. 199. No. 8. P. 1845—1855. doi: 10.1242/jeb.199.8.1845.

10. Stenseng E., Braby C. E., Somero G. N. Evolutionary and acclimation-induced variation in the thermal limits of heart function in congeneric marine snails (genus *Tegula*): Implications for vertical zonation // Biological Bulletin. 2005. Vol. 208. No. 2. P. 138—144.
11. Dong Yw., Williams G. A. Variations in cardiac performance and heat shock protein expression to thermal stress in two differently zoned limpets on a tropical rocky shore // Marine Biology. 2011. Vol. 158. P. 1223—1231. doi: 10.1007/s00227-011-1642-6.
12. Han G. D., Zhang S., Marshall D. J. et al. Metabolic energy sensors (AMPK 487 and SIRT1), protein carbonylation and cardiac failure as biomarkers of thermal stress in an 488 intertidal limpet: linking energetic allocation with environmental temperature during aerial 489 emersion // The Journal of Experimental Biology. 2013. Vol. 216. No. 17. P. 3273—3282. doi: 10.1242/jeb.084269.
13. Xing Q., Li Y., Guo H. et al. Cardiac performance: a thermal tolerance indicator in scallops // Mar. Biol. 2016. Vol. 163. P. 244. doi: 10.1007/s00227-016-3021-9
14. Chen N., Luo X., Gu Y. et al. Assessment of the thermal tolerance of abalone based on cardiac performance in *Haliotis discus hannai*, *H. gigantea* and their interspecific hybrid // Aquaculture. 2016. Vol. 465. P. 258—264. doi: 10.1016/j.aquaculture.2016.09.004
15. Alter K., Andrewartha S. J., Morash A. J. et al. Hybrid abalone are more robust to multi-stressor environments than pure parental species // Aquaculture. 2017. Vol. 478. P. 25—34. doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.04.035
16. Li W., Rong R., Zhao S. et al. Proteomic analysis of metabolic, cytoskeletal and stress response proteins in human heart failure // J. Cell. Mol. Med. 2012. Vol. 16. No.1. P. 59—71. doi: 10.1111/j.1582-4934.2011.01336.x
17. Gebauer M., Zeiner M., Gehring U. Proteins interacting with the molecular chaperone hsp70/hsc70: physical associations and effects on refolding activity // FEBS Lett. 1997. Vol. 417. No.1. P. 109—113. doi: 10.1016/S0014-5793(97)01267-2
18. Terada K., Kanazawa M., Bukau B., Mori M. The human DnaJ homologue dj2 facilitates mitochondrial protein import and luciferase refolding // J. Cell Biol. 1997. Vol. 139. No. 5. P. 1089—1095. doi: 10.1083/jcb.139.5.1089
19. Gleason L. U., Burton R.S. RNA-seq reveals regional differences in transcriptome response to heat stress in the marine snail *Chlorostoma funebris* // Mol. Ecol. 2015. Vol. 24. No. 3. P. 610—627. doi: 10.1111/mec.13047
20. Chen N., Luo X., Lu C. et al. Effects of artificial selection practices on loss of genetic diversity in the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* // Aquac. Res. 2017. Vol. 48. No. 9. P. 4923—4933. doi: 10.1111/are.13311
21. Сафонова Т. А., Журавлев В. Л., Ноздрачев А. Д. Кардиореспираторная система моллюсков: структура, функции, механизмы регуляции. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2008. 242 с.
22. Uvaeva O. I. The influence of heavy metals ions on filtering work of freshwater molluscs // Вопросы биоиндикации и экологии. 2011. № 16-2. С. 161—168.
23. Уваева О. И. Фильтрационная активность живородки болотной (Mollusca: Opisthobranchia, Viviparidae) при действии различных абиотических факторов водной среды // Вестник Львовского университета. Серия биологическая. 2012. Вып. 58. С. 144—149.
24. Вербицкий В. В., Шаров А. Н., Холодкевич С. В. Определение терморезистентности двустворчатых моллюсков *Unio pictorum* по кардиоактивности // Труды Института биологии внутренних вод. 2020. № 89(92). С. 50—57. doi: 10.24411/0320-3557-2020-10005.
25. Ежегодники качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Ленинградская область) за 2020—2022 гг. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды».
26. Kholodkevich S., Kuznetsova T., Sharov A., et al. Applicability of a bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland // J. Mar. Syst. 2017. Vol. 171. P. 151—158. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.005
27. Xing Q., Zhang L., Li Yu. et al. Development of novel cardiac indices and assessment of factors affecting cardiac activity in a bivalve mollusk *Chlamys farreri* // Frontiers Physiol. 2019. Vol. 10. P. 293. doi: 10.3389/fphys.2019.00293

28. Chen N., Huang Z., Lu C. et al. Different responses to thermal stress in heat-tolerant and heat-sensitive Pacific abalones indicated by cardiac performance // *Front. Physiol.* 2019. Vol. 9. P. 1895. doi: 10.3389/fphys.2018.01895
29. Rahman Z., Singh V.P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview // *Environ Monit Assess.* 2019. Vol. 191. P. 419. doi: 10.1007/s10661-019-7528-7.
30. Шаров А. Н., Березина Н. А., Куприянов И. И и др. Кадмий в восточной части Финского залива: содержание и воздействие на моллюсков *Limicola balthica* // *Геохимия.* 2022. Т. 67. № 7. С. 686—695. doi: 10.31857/S0016752522060073

References

1. Widdows J., Donkin P. Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. *The mussel Mytilus: ecology, physiology, genetics and aquaculture.* Elsevier, 1992: Amsterdam. 383—424.
2. Nemova N. N. *Biokhimicheskiye efekty nakopleniya rtuti u ryb = Biochemical effects of mercury accumulation in fish.* M.: Science, 2005: 168 p. (In Russ.).
3. Fokina N. N., Nefedova Z. A., Nemova N. N. *Lipidnyy sostav midiy Mytilus edulis L. Belogo morya. Vliyaniye nekotorykh faktorov sredi obitaniya = Lipid composition of the mussels Mytilus edulis L. from the White Sea. The influence of some environmental factors.* Petrozavodsk. Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010: 243 p. (In Russ.).
4. Moiseenko T. I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical levels of pollution. *Geokhimiya = Geochemistry.* 2019; (64):(675—688). (In Russ.).
5. Mikhailov R. A. Features of the spatial distribution of Viviparus (*Viviparus viviparus*) (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) of the lowland river of the Lower Volga. *Rossiyskiy zhurnal ekosistemnoy ekologii = Russian Journal of Ecosystem Ecology.* 2020;5(3):(1—10). doi: 10.21685/2500-0578-2020-3-12 (In Russ.).
6. Somero G. N. The physiology of climate change: How potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers’. *J. Exp. Biol.* 2010;213(6):912—920.
7. De Wit P., Palumbi S. R. Transcriptome-wide polymorphisms of red abalone (*Haliotis rufescens*) reveal patterns of gene flow and local adaptation. *Molecular Ecology.* 2013;22(11):2884—2897. doi: 10.1111/mec.12081.
8. De Wit P., Rogers-Bennett L., Kudela R. M. et al. Forensic genomics as a novel tool for identifying the causes of mass mortality events. *Nature Communications.* 2014;(5):3652. doi: 10.1038/ncomms4652.
9. Stillman J. H., Somero G. N. Adaptation to temperature stress and aerial exposure in congeneric species of intertidal porcelain crabs (genus *Petrolisthes*): correlation of physiology, biochemistry and morphology with vertical distribution. *The Journal of Experimental Biology.* 1996;199(8):1845—1855. doi: 10.1242/jeb.199.8.1845.
10. Stenseng E., Braby C. E., Somero G. N. Evolutionary and acclimation-induced variation in the thermal limits of heart function in congeneric marine snails (genus *Tegula*): Implications for vertical zonation. *Biological Bulletin.* 2005;208(2):138—144.
11. Dong Yw., Williams G. A. Variations in cardiac performance and heat shock protein expression to thermal stress in two differently zoned limpets on a tropical rocky shore. *Marine Biology.* 2011;(158):1223—1231. doi: 10.1007/s00227-011-1642-6.
12. Han G. D., Zhang S., Marshall D. J. et al. Metabolic energy sensors (AMPK 487 and SIRT1), protein carbonylation and cardiac failure as biomarkers of thermal stress in an intertidal limpet: linking energetic allocation with environmental temperature during aerial emersion. *The Journal of Experimental Biology.* 2013;216(17):3273—3282. doi: 10.1242/jeb.084269.
13. Xing Q., Li Y., Guo H. et al. Cardiac performance: a thermal tolerance indicator in scallops. *Marine Biology.* 2016;(163):244. doi: 10.1007/s00227-016-3021-9.
14. Chen N., Luo X., Gu Y. et al. Assessment of the thermal tolerance of abalone based on cardiac performance in *Haliotis discus hannai*, *H. gigantea* and their interspecific hybrid. *Aquaculture.* 2016;(465):258—264. doi: 10.1016/j.aquaculture. 2016.09.004.

15. Alter K., Andrewartha S. J., Morash A. J. et al. Hybrid abalone are more robust to multi-stressor environments than pure parental species. *Aquaculture*. 2017;(478):25—34. doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.04.035.
16. Li W., Rong R., Zhao S. et al. Proteomic analysis of metabolic, cytoskeletal and stress response proteins in human heart failure. *J. Cell. Mol. Med.* 2012;16(1):59—71. doi: 10.1111/j.1582-4934.2011.01336.x.
17. Gebauer M., Zeiner M., Gehring U. Proteins interacting with the molecular chaperone hsp70/hsc70: physical associations and effects on refolding activity. *FEBS Lett.* 1997;417(1):109—113. doi: 10.1016/S0014-5793(97)01267-2.
18. Terada K., Kanazawa M., Bukau B. et al. The human DNAj homologue dj2 facilitates mitochondrial protein import and luciferase refolding. *J. Cell Biol.* 1997;139(5):1089—1095. doi: 10.1083/jcb.139.5.1089.
19. Gleason L. U., Burton R. S. RNA-seq reveals regional differences in transcriptome response to heat stress in the marine snail *Chlorostoma funebris*. *Mol. Ecol.* 2015;24(3):610—627. doi: 10.1111/mec.13047.
20. Chen N., Luo X., Lu C. et al. Effects of artificial selection practices on loss of genetic diversity in the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai*. *Aquac. Res.* 2017;48(9):4923—4933. doi: 10.1111/are.13311.
21. Safonova T. A., Zhuravlev V. L., Nozdrachev A. D. *Kardiorespiratornaya sistema mollyuskov: stroyneniye, funktsii, mekhanizmy regulyatsii = Cardiorespiratory system of mollusks: structure, functions, regulatory mechanisms*. St. Petersburg University Publishing House, 2008: 242 p. (In Russ.).
22. Uvaeva O. I. The influence of heavy metals ions on filtering work of freshwater molluscs. *Bioindikatsiya i voprosy ekologii = Bioindication Issues and Ecology*. 2011;16(2):(161—168).
23. Uvaeva O. Filtration activity of the marsh viviparous (Mollusca: Opisthobranchia, Viviparidae) in action of various abiotic factors of aquatic environment. *Vestnik L'vovskogo universiteta. Seriya biologicheskaya = Bulletin of Lviv University. Series biological*. 2012;(58):(144—149).
24. Verbitsky V. V., Sharov A. N., Kholodkevich S. V. Determination of thermoresistance of the bivalves *Unio pictorum* by cardioactivity. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod = Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters*. 2020;89(92):(50—57). doi: 10.24411/0320-3557-2020-10005. (In Russ.).
25. *Yezhegodniki kachestva poverkhnostnykh vod sushi po gidrokhimicheskim pokazatelyam na territorii deyatel'nosti FGBU «Severo-Zapadnoye UGMS» (Leningradskaya oblast') za 2020—2022 gg. = Yearbooks of the quality of terrestrial surface waters by hydrochemical indicators in the territory of activity of the Federal State Budgetary Institution “North-West UGMS” (Leningrad Region) for 2020—2022*. St. Petersburg. Federal State Budgetary Institution “North-Western Department for Hydro-meteorology and Environmental Monitoring”. (In Russ.).
26. Kholodkevich S., Kuznetsova T., Sharov A. et al. Applicability of a bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland. *J. Mar. Syst.* 2017;(171):151—158. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.005.
27. Xing Q., Zhang L., Li Yu. et al. Development of Novel cardiac indices and assessment of factors affecting cardiac activity in a bivalve mollusk *Chlamys farreru*. *Frontiers Physiol.* 2019;(10):293. doi: 10.3389/fphys.2019.00293.
28. Chen N., Huang Z., Lu C. et al. Different responses to thermal stress in heat-tolerant and heat-sensitive Pacific abalones indicated by cardiac performance. *Front. Physiol.* 2019;(9):1895. doi: 10.3389/fphys.2018.01895.
29. Rahman Z., Singh V. P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. *Environ Monit Assess.* 2019;(191):419. doi: 10.1007/s10661-019-7528-7.
30. Sharov A. N., Berezina N. A., Kupriyanov I. et al. Cadmium in the eastern part of the Gulf of Finland: content and impact on the mollusks *Limecola balthica*. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2022;67(7):(686—695). doi: 10.31857/S0016752522060073. (In Russ.).

Информация об авторах

Камардин Николай Николаевич, доктор биологических наук, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, ведущий научный сотрудник, nik-kamardin@yandex.ru.

Кузнецова Татьяна Владимировна, кандидат биологических наук, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, старший научный сотрудник, kuznetsova.tv@spcras.ru.

Манвелова Александра Борисовна, научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, manvelova.a@spcras.ru.

Information about authors

Kamardin Nikolai Nikolaevich, Doctor Biol. Sci., Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Leading Scientist.

Kuznetsova Tatiana Vladimirovna, Ph.D. Biol. Sci., Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Senior Scientist.

Manvelova Aleksandra Borisovna, Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 27.04.2024

Принята в печать после доработки 26.08.2024

The article was received on 27.04.2024

The article was accepted after revision on 26.08.2024

УДК [502.131.1:004.032.26](063)

**Конгресс IEEE «Пояс и путь» 2024 года
по искусственному интеллекту для устойчивого развития
(IEEE AICON2024)**

Вячеслав Георгиевич Бурлов

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
burlovvg@mail.ru.

В десятую годовщину инициативы «Один пояс, один путь» Китайская ассоциация по искусственному интеллекту и Китайский совет IEEE провели Конгресс IEEE «Один пояс, один путь» 2024 года по искусственному интеллекту (ИИ) для устойчивого развития, направленный на создание международной платформы обмена и сотрудничества, реализацию восьми действий высококачественного совместного строительства «Одного пояса, одного пути», продвижения научных и технологических инноваций, ускорение интеллектуальной трансформации и обеспечение интеллектуальной безопасности с помощью глобальной модели



Рис. 1. Эмблема Конгресса.

совместного создания открытости, инклюзивности, взаимосвязанности и общего развития с целью сбора передовых достижений и широкого консенсуса, а также распространения выдающейся мудрости и зрелого опыта для достижения модернизированного развития стран по всему миру. Этот конгресс состоялся 22–23 июня 2024 года в Ханчжоу, Китай.

Правительственные должностные лица, руководители научно-исследовательских институтов и предприятий, а также гости из общественных организаций в соответствующих странах «*Одного пояса и пути*» были приглашены к участию, создавая сеть сотрудничества вокруг структуры информационного обеспечения, способствующего устойчивому развитию для содействия «*Одного пояса и пути*» и устойчивому развитию теории и практики искусственного интеллекта.

На заседаниях конгресса были заслушаны научные доклады ученых университетов и представителей промышленности в областях ИИ, электронных технологий и информатики, компьютеров и т. д. Благодаря мероприятиям высокого уровня, таким, как правительственные форумы, форумы сотрудничества «отрасль-университет-институт» и обмены докладами, конгресс должен укрепить сотрудничество «отрасль-университет-институт» в области ИИ и углубить академические обмены и обсуждения в стране и за рубежом для достижения более высокого качества и более высокого уровня совместного строительства «*Одного пояса и пути*».

В конгрессе приняли участи многие видные ученые:

— **Ли Дэйи** — почетный председатель Восьмого Совета СААИ, академик Китайской академии инженерных наук, академик Международной Евразийской академии наук, член СААИ;

— **Фан Вэйчэн** — академик Китайской академии инженерии, директор Института исследований общественной безопасности Университета Цинхуа, директор Центра исследований национальной безопасности;

— **Мэн Сяофэн** — директор Комитета СААИ по социальным вычислениям и социальному интеллекту, профессор университета Renmin (Китай), лауреат CCF;

— **Сан Фухун** — вице-президент СААИ, профессор кафедры Компьютерных наук и технологий Университета Цинхуа, лауреат Национального научного фонда для выдающихся молодых ученых, стипендиат IEEE/СААИ/САА.

— **Торстен Елинек** — приглашенный профессор, Научно-исследовательский институт аэрокосмической информации, Китайская академия наук (Европа); директор, Института Тайхэ, научный сотрудник, Центра цифрового управления школы Hertie;

— **Манзур Х. Сумро** — лауреат Премии дружбы правительства Китая 2020 года, лауреат французского Ордена Академических Пальм, Иностраный член Академии инженерии и технологий АСЕАН (ААЕТ), член-основатель Академии инженерии и технологий для развивающихся стран;

— **Ли Вэньчжэн** — исполнительный директор Совета IEEE Китая, председатель Комитета по промышленному сотрудничеству и инновациям, профессор Пекинского технологического университета;

— **Гуо Хуадун** — академик Китайской академии наук, иностранный академик Российской академии наук, директор Международного исследовательского



Рис. 2. Участники конгресса

центра больших данных для целей устойчивого развития, профессор, член Международного научного совета;

— **Ду Сяопин** — профессор в Институте аэрокосмических информационных исследований, Китайская академия наук, заместитель директора Департамента технологий больших данных в Международном исследовательском центре больших данных для целей устойчивого развития;

— **Хуан Куанши** — заместитель директора Профессионального Комитета по социальным вычислениям и социальному интеллекту СААИ, профессор Китайского центра исследований населения и развития;

— **Чжан Цзыкэ** — профессор Чжэцзянского университета Шахзад;

— **Чжан Хуэй** — профессор и заместитель директора Института исследований общественной безопасности Университета Цинхуа;

— **Шахзад Сарфраз** — профессор и директор FAST-Национального университета компьютерных и новых наук, Кампус CFD, Пакистан;

— **Ванг Вайнинг** — генеральный секретарь СААИ, научный сотрудник Пекинского университета почт и телекоммуникаций;

— **Занг Хуи** — профессор и заместитель декана Института исследований общественной безопасности Университета Цинхуа;

— **Занг Цин** — заместитель генерального секретаря СААИ, профессор Института вычислительной технологии, Китайская академия наук (CAS), лауреат СААИ.

На конгрессе работали следующие секции:

- Искусственный интеллект и новые технологии.
- Возможности и новые риски для глобального снижения риска стихийных бедствий и искусственный интеллект.
- Искусственный интеллект и устойчивое развитие населения.
- Искусственный интеллект, здоровье и благополучие.



Рис. 3. В зале заседаний.

- Умные города и сообщества для устойчивого развития.
- Платформы больших данных, поддерживающие устойчивое развитие.
- Устойчивое развитие океанов и прибрежных зон.

В конгрессе участвовали учёные по искусственному интеллекту и его применению из Китая, Пакистана, Японии, Индии, Малайзии, Вьетнама, Швеции, Франции, Германии, США, Чили, Сингапура, России и ряда других стран.

Россию в качестве почетного гостя конгресса представлял профессор Российского государственного гидрометеорологического университета Бурлов Вячеслав Георгиевич, который по просьбе Китайской ассоциации искусственного интеллекта прочитал лекцию «*Методология формирования системообразующего фактора построения и функционирования системы искусственного интеллекта в теории безопасности*». Автором продвигается проработка вопросов геоинформационного управления. Решение задач этого направления требует внедрения идеологии и моделей построения и функционирования системы искусственного интеллекта.

При интеллектуализации управленческой деятельности целесообразно трактовать искусственный интеллект как способность математического моделирования рационального поведения человека. Например, известный специалист Luger [1] при рассмотрении проблем ИИ предлагает согласовать и определить понятия интеллекта и искусственного интеллекта. Для формирования таких понятий необходимо раскрыть механизмы познания и осознания человеком процессов окружающего мира.

Под интеллектом следует понимать свойство человеческой деятельности, характеризующее его способность в интересах формирования решений применять три основных метода [2]:

- декомпозицию;

- абстракцию;
- агрегацию.

Искусственный интеллект (ИИ) можно определить как область компьютерной науки, автоматизирующую разумное поведение человека [3]. ИИ следует понимать как свойство технического объекта (ТО). Это свойство ТО отражает рациональное поведение человека. Основой поведения является решение человека [4]. Имея адекватную математическую модель решения человека, мы получаем возможность автоматизировать рациональное поведение человека. Такой научный результат позволит реализовать интерпретацию ИИ Люгером [1].

Рассмотрение ИИ должно базироваться на естественнонаучном подходе. Естественнонаучный подход определяется интеграцией свойств человеческого мышления, свойств окружающего мира и свойств всеобщей связи явлений [5, 6]. В деятельности человека моделирование как способ отражения объективной реальности или мышления применяется с древнейших времен. Математическое моделирование в различных формах пронизывает все современные науки. Математическое моделирование все больше приобретает черты системного многомодельного исследования. Само понятие модели в процессе своего развития стало общенаучным, системно-кибернетическим понятием.

Модель — это описание или представление объекта, которое соответствует этому объекту и позволяет получить характеристики об этом объекте [5, 6].



Рис. 4. Участник конгресса – д.т.н., профессор В. Г. Бурлов (РГГМУ).

На конгрессе присутствовал научный партнёр профессора В. Г. Бурлова профессор Чэнь Цзяньго — директор Научно-технического центра городской безопасности Института Хэфэй по исследованиям общественной безопасности Университета Цынхуа, сотрудничество с которым осуществляется с 2019 года. В 2022 году профессор Чэнь Цзяньго сделал доклад на пленарном заседании научной конференции ИнфоГео 2022 «Обеспечение безопасности транспортировки грузов при морских перевозках». С профессором Чэнь Цзяньго была согласована совместная деятельность по участию в конкурсах РФ.

Участие в конгрессе позволило продемонстрировать научно-технические возможности Российского государственного гидрометеорологического университета в интересах внедрения современных методов и моделей искусственного интеллекта в процессы образовательной, научной и проектной деятельности.

Высоко оценивая данное мероприятие, можно сделать следующий вывод: «На конгрессе были представлены научные доклады от ученых и представителей промышленности по тематике искусственного интеллекта, информационных технологий, информатики и других разделов компьютерных наук. Таким образом, конгресс позволяет укрепить научное сотрудничество между промышленностью, университетами и исследователями в области искусственного интеллекта различных стран. Обмен результатами исследований позволяет обеспечить качественное и высокоуровневое построение системы искусственного интеллекта на благо всего человечества».

Список литературы

1. Luger G. F. Artificial Intelligence: Strategies and Methods for Solving Difficult Problems, 4th ed. : Trans. from English. M.: Publishing house “Williams”, 2003: 432 p.
2. Burlov V. G. The methodological basis for solving the problems of the information war-fare and security protection. *Proceedings of the 13th International Conference on Cyber Warfare and Security, ICCWS 2018 National Defense University Washington DC, USA*. 2018: 64—74.
3. Burlov V. G. Mathematical Model of Human Decision: A Methodological Basis for the Functioning of the Artificial Intelligence System. *2nd European Conference on the Impact of Artificial Intelligence and Robotics, ECI AIR 2020. 22 – 23rd October 2020, Instituto Universitário de Lisboa (IS-CTE-IUL)*. Portugal. 2020: 38—49.
4. Моисеев Н. Н. Математические проблемы системного анализа. М.: Наука, 1981. 468 с.
5. Burlov V. G., Grobitski A.M., Grobitskaya A.M. Construction management in terms of indicator of the successfully fulfilled production task. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; (3): 77—91. doi: 10.5862/MCE.63.5.
6. Burlov V. G. On the concept of guaranteed management of sustainable development of the Arctic zone based on the inverse problem solving. *Information technologies and systems: management, economics, transport, and law*. 2015; 2 (16): 99—111. (in Russ.).

Информация об авторе

Вячеслав Георгиевич Бурлов, доктор технических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, burlovg@mail.ru.

УДК 001(092)

Памяти известного ученого, ректора ЛГМИ (1963—1972 гг.) — Олега Александровича Алекина

Алла Олеговна Волгушева

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
Volgusheva_irbis@mail.ru

Аннотация. В статье на основе неопубликованных архивных документов (ЦГА СПб, ЦГАПИД СПб) представлена профессиональная и научная деятельность Олега Александровича Алекина – известного ученого-гидрохимика, доктора географических наук, профессора, члена-корреспондента Академии наук СССР, ректора Ленинградского гидрометеорологического института (ЛГМИ) с 1963–1972 гг.

Ключевые слова: Олег Александрович Алекин, ученый-гидрохимик, Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), золото в природных водах, гидрохимия рек, Институт озерадения АН СССР.

Российский государственный гидрометеорологический университет в 2025 году отмечает свое 95-летие. В нем трудилось много выдающихся ученых, среди которых Олег Александрович Алекин, со дня смерти которого прошло 30 лет и память о котором нам очень важна и дорога.

Олег Александрович Алекин родился 23 августа 1908 года в Вильно в семье служащих или, как он сам указывал в своей автобиографии, в семье мещан. Его отец — Алекин Александр Петрович, уроженец Петербурга, всю жизнь служил на железной дороге бухгалтером, мать, в девичестве Яблонская Лидия Ивановна, была домохозяйкой. У О. А. Алекина было два брата. Родители дали детям хорошее воспитание и старались развивать у них интерес к знаниям.

Из автобиографии следует, что Олег Александрович Алекин учился в Ленинградском химическом техникуме им. Д. И. Менделеева в 1926—1930 гг. После окончания техникума он поступил в Ленинградский государственный университет, который закончил в 1938 г., получив специальность техник-химик, химик-неорганик.

Научная жизнь ученого была насыщенной и разнообразной. Будучи еще студентом, он стал активным участником различных экспедиций в качестве гидрохимика. Одной из первых была Телецкая экспедиция в 1929 г. С 1930 года он начал работать лаборантом в Государственном гидрологическом институте. С 1931 г. стал членом секции научных работников профессионального союза работников просвещения (СНР). В 1932 г. был квалифицирован Квалификационной Комиссией СНР как научный сотрудник, а в 1933 году — как старший научный сотрудник. В 1935 г. представлен Ученым Советом ГГИ к званию старшего научного сотрудника, в котором утвержден 4 июня 1938 года Квалификационной Комиссией ГУГМС СССР (Центральный государственный архив СПб, ЦГА).

После окончания ЛГУ в 1938 г. сразу становится заместителем руководителя гидрохимической лаборатории, занимается вопросами методики

гидрохимического анализа и исследованиями гидрохимического режима вод суши. При этом Олегу Александровичу удавалось совмещать работу в лаборатории с работой ассистента Ленинградского государственного университета вплоть до начала войны.

В течение десяти лет работы в Государственном гидрологическом институте О. А. Алекин занимался изучением химии природных вод в различных отраслях гидрологии, лимнологией, гидрогеологией и потамологией, а также специальными вопросами методики гидрохимических исследований. С 1929 г. по 1932 г. работал над изучением Телецкого озера в качестве сотрудника Озерного отдела. В 1932 г. он являлся начальником экспедиции Западного Сибирского Гидрометеорологического Управления, проводившей исследования в центральном Алтае, где были открыты две высокогорные станции. В 1933 г. — начальником Алтайской партии лимнологической съемки. В 1934 г. он участвовал в работах Чудской экспедиции, проводившей исследование Чудского и Псковского озер. Результаты экспедиций были представлены в ряде научных отчетов и статей.

В 1935 г. в составе группы Гидрозолото Речного отдела ГГИ занимался разработкой метода определения золота в природных водах и приложения его для целей изучения золотосодержания бассейна рек, участвовал в экспедиции Гидрозолото в Ленинградском горном институте в должности инженера-химика. За это время была закончена разработка метода определения золота в природных водах. Работа была представлена на Ученом Совете НИС Горного института и послужила материалом для составления двух статей.

С 1 июня 1936 г. по 20 января 1938 г. в качестве старшего химика в Отделе Оборона О. А. Алекин занимался исследованием природных вод, принимал участие в двух экспедициях и написал ряд очерков по химизму поверхностных и подземных вод.

Из деловой характеристики на старшего научного сотрудника государственного гидрологического Института, написанной директором вуза, мы узнаем, что «Алекин проявил себя вполне самостоятельным, серьезным и весьма продуктивным научным работником, всего им было написано 23 научных статьи. За время десятилетней работы в стенах института он проявил себя как ударник, четко в срок и досрочно выполнявший поставленные перед ним производственные задания. Наряду с большой научно-исследовательской и педагогической работой, активно участвовал в различных кампаниях, проводимых общественными организациями института, неоднократно премировался за производственные достижения и утверждался в звании ударника» (ЦГА). В архивных документах хранится заявление от гр. Алекина Олега Александровича — старшего научного сотрудника Государственного гидрологического института и ассистента химического факультета Ленинградского государственного университета:

«Прошу разрешить мне защитить при вверенном учреждении диссертацию на соискание степени кандидата химических наук по теме «Золото в природных водах» от 21 декабря 1939 г.» (ЦГА). Официальными оппонентами по кандидатской диссертации у О. А. Алекина были профессор С. А. Щукарев и профессор С. А. Толкачев.

Представляет интерес отзыв, написанный профессором С. А. Толкачевым: «...заманчивая идея получить золото из такого неисчерпаемого источника, как вода морей и океанов, привлекала с половины прошлого столетия внимание многих исследователей. Прежде чем приступить к добыче золота из морской воды, необходимо было определить его содержание в ней, а для этого надо было разработать соответствующие методы анализа. Эта задача оказалась нелегкой, так как содержание золота в морской воде чрезвычайно мало. Цифры, получаемые различными исследователями, применявшими различные методы, колебались в больших пределах, что показывает, что методы определения недостаточно точны и нуждаются в дальнейших исследованиях. Автор справился с этой задачей и добился возможности определять золото в количествах до 0,0001 мг» (ЦГА).

С точки зрения другого оппонента, профессора С. А. Щукарева, наибольший интерес представляет та часть работы, в которой автор дает обоснование разработанной им методики. Несмотря на то, что со слов Щукарева, она не является вполне оригинальной и представляет собой комбинацию приемов, заимствованных у Шейблера, Ясуда и Габера, тем не менее, оппонент признает, что автор диссертации вносит целый ряд новых деталей в методику и добивается количественных определений золота при содержании последнего до одной стотысячной мг. С. А. Щукарев отмечает, что работа вносит несомненный вклад в науку о микроанализе и имеет значение для практики (ЦГА). Защита диссертации состоялась 25 марта 1940 г., Совет химического факультета ЛГУ присудил О. А. Алекину ученую степень кандидата химических наук.

Однако 1941 г. внес изменения в жизнь всех людей нашей страны, и Олег Александрович Алекин ушел служить на Ленинградский фронт, стал начальником химической службы 196 стрелкового полка, 13 стрелковой дивизии, находясь в звании капитана. Участвовал в боях на подступах к Ленинграду в 1941 году и в боях по прорыву блокады Ленинграда в 1943 году, однако после тяжелого ранения под Синявино демобилизовался в Архангельск как инвалид Отечественной войны. Он был награжден орденом Красной звезды и медалями «За оборону Ленинграда» и «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.» (Центральный государственный архив историко-политических документов Санкт-Петербурга, ЦГАПИД).

С сентября 1943 г. по 1945 г. О. А. Алекин работал в Архангельском медицинском институте в должности доцента и по совместительству декана.

Защитив в 1950 г. докторскую диссертацию на тему «Гидрохимия рек СССР», О. А. Алекин в 1951 г. получил Сталинскую премию в области науки. В этом же году был назначен директором Гидрохимического института АН СССР в Новочеркасске Ростовской области. Эту должность он занимал до 1960 г., совмещая с должностью ректора Ростовского государственного университета (1954—1957 гг.).

После 10 лет работы в Новочеркасске Олега Александровича Алекина переводят в Ленинград, где он сначала занимает должность старшего научного сотрудника Лаборатории озераведения АН СССР, затем — заведующего гидрохимического сектора.

Большой управленческий опыт и последовательная научная карьера позволили ему возглавить Гидрометеорологический институт (ЛГМИ), ректором которого он был на протяжении почти десяти лет (1963—1972 гг.).

При нем институт успешно работает, происходит развитие кибернетической направленности обучения, вводятся в строй первые большие ЭВМ. Происходят и структурные изменения: 16 января 1969 г. на основании Приказа Министерства высшего и среднего специального образования в Ленинградском гидрометеорологическом институте была организована проблемная научно-исследовательская лаборатория взаимодействия океана и атмосферы и подводных исследований, основными направлениями научной деятельности которой стали:

— изучение формирования основных процессов, протекающих в океане и атмосфере;

— исследование закономерностей, управляющих изменением этих процессов в системе океан-атмосфера;

— разработка новых методов краткосрочных и долгосрочных прогнозов гидрологических и метеорологических условий океанов и морей; совершенствование методики долгосрочных и перспективных гидрологических прогнозов для промысловых районов океана;

— развитие теории и методов расчета термодинамического и химического взаимодействия океана и атмосферы;

— экспериментальное теоретическое изучение основных физико-химических процессов в океане и развитие методов расчета циркуляции вод океана;

— разработка новых методов подводных океанографических исследований для удовлетворения потребностей различных отраслей народного хозяйства (ЦГА).

На основании приказа Министерства высшего и среднего специального образования от 23 июня 1969 г. был организован океанологический факультет и открыта кафедра методов океанологических исследований.

Из отчета о научно-исследовательской работе института за 1971 г. видно содержание научных исследований:

— изучение процессов взаимодействия соприкасающихся слоев атмосферы и океана с целью их расчета и прогноза;

— физические основы воздействия на погоду;

— разработка приборов с целью автоматизации гидрометеорологических измерений и улучшения обслуживания народного хозяйства;

— исследования в области загрязнения атмосферы и гидросферы;

— развитие методов космической гидрометеорологии;

— разработка перспективных методов метеорологического обеспечения современной авиации;

— развитие методов исследований, расчетов и прогнозов поверхностного стока и подземных вод.

Таким образом, в начале 1970-х гг. складывается структура института, основные особенности которой сохранялись вплоть до 1990-х гг. Три базовых факультета — метеорологический, гидрологический и океанологический — соответствовали

сложившемуся к тому времени и существующему поныне отраслевому разделению гидрометеорологической науки и практики на направления, изучающие атмосферу, воды суши и Мировой океан.

Покинув должность ректора ЛГМИ, Олег Александрович не стал обычным советским пенсионером, его энергия и стремление заниматься любимым делом привели его в Институт озераведения АН СССР, который был создан в 1971 г. на базе бывшей Лаборатории озераведения.

С 1973—1976 гг. он занимает должность заместителя директора по научной работе. С 1976—1977 гг. становится и. о. директора ИОЗ АН СССР. С 1977—1982 гг. О. А. Алекин вновь на руководящей позиции, возглавляя институт (ЦГАПИД). После 1982 года Олег Александрович Алекин продолжает работать в институте в качестве консультанта, находясь в должности ведущего научного сотрудника института.

В 1995 г. Олег Александрович умирает, но РГГМУ (бывший ЛГМИ) помнит и чтит память этого великого ученого с большой буквы, который внес значительный вклад в развитие единственного в мире гидрометеорологического вуза. Им было опубликовано более 100 научных работ, среди которых несколько монографий, переведённых на иностранные языки. Олег Александрович Алекин, обладая огромным опытом руководящей работы, преподавательской деятельности, всю свою жизнь искренне служил своему делу, подавая пример новым поколениям ученых, имел плеяду благодарных студентов и признательных коллег.

Информация об авторе

Волгушева Алла Олеговна, Кандидат исторических наук, Кафедра социально-гуманитарных наук РГГМУ, доцент, Volgusheva_irbis@mail.ru.

УДК [332.1:551.461.25](063)

Мероприятие-спутник конгресса молодых ученых по смягчению последствий изменения уровня режима Каспийского моря для экономики Республики Дагестан

Петр Иванович Бухарицин¹, Валерий Николаевич Малинин²

¹ Институт водных проблем РАН, Астрахань, piter@bukharitsin.com

² Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru

18–20 сентября 2024 г. в Махачкале состоялось «Мероприятие-спутник Конгресса молодых ученых». Такие мероприятия проводятся уже третий год в рамках Десятилетия науки и технологий, объявленного Указом Президента Российской Федерации от 25 апреля 2022 года № 231 «Об объявлении в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий». Целью Мероприятия-спутника является вовлечение российского научного сообщества в решение широкого спектра практических задач региона.

Главная задача Конгресса состояла в разработке подробных научно-обоснованных краткосрочных и долгосрочных подходов и предложений по смягчению последствий изменения уровня режима Каспийского моря для экономики региона, для морских перевозок; оценка влияния на реализацию МТК Север-Юг, на развитие Каспийского туристического кластера и т.д.

Как известно, уровень моря имеет устойчивую тенденцию к падению с 1996 г. За это время он уже понизился до критической отметки –29 м (рис. 2), ниже которой наступит катастрофа для рыбного промысла, поскольку произойдет осушение нерестилищ ценных пород рыбы в северной части моря, поэтому проблема прогноза уровня на перспективу приобретает стратегическое научное и практическое значение.



Рис. 1. Эмблема конгресса.



Рис. 2 Межгодовая изменчивость уровня Каспийского моря (м) в Балтийской системе.

Эксперты данного мероприятия были разделены на 4 проектные группы:

1. Селекционные и технологические особенности адаптации отраслей растениеводства в условиях глобального изменения климата.
2. Комплекс мер по борьбе с опустыниванием в северных равнинных районах Дагестана.
3. Разработка технологий концентрирования и извлечения редких щелочных металлов из высокоминерализованных геотермальных вод Республики Дагестан.
4. Выработка предложений по смягчению последствий изменения уровня режима Каспийского моря для экономики Республики Дагестан.

Во время мероприятия участники работали в проектных группах совместно с представителями власти и бизнеса региона, высказывали свои предложения по решению задач региона на основе собственных проведенных исследований и разработок, а также совершали выезды на объекты региональной инфраструктуры. В финальный день мероприятия состоялась защита проектов перед представителями Правительства региона.

Формулировка задачи:

Интегратором решения проблемы будет выступать Министерство образования и науки Республики Дагестан; функциональным и технологическим заказчиком решения проблемы — Правительство Республики Дагестан. Решение проблемы возможно путем широкого научного обсуждения и дальнейшего проведения НИР.

Ожидаемый результат:

Разработка подробных научно-обоснованных краткосрочных и долгосрочных подходов решения проблемы. Выработка предложений по смягчению последствий изменения уровня режима Каспийского моря для экономики региона, для морских перевозок, оценка влияния на реализацию МТК Север-Юг, на развитие Каспийского туристического кластера и т.д.

Приоритетное значение имела 4 проектная группа, поскольку ей, прежде всего, предстояло определить уровень тяготения моря на ближайшую перспективу (5—10 лет), т.е. такой уровень, при достижении которого наступают равновесные условия водного баланса и он начинает испытывать в основном случайные колебания относительно этой отметки. Задача крайне сложная, ибо до настоящего времени нет консенсуса в том, как будет себя вести уровень в обозримом будущем.

Экспертам нашей группы предстояло мозговым штурмом буквально в течение часа найти консенсус по оценке уровня тяготения. От этого зависела вся наша последующая работа. В состав группы входило 20 экспертов. Модератор — д. г. н. Горбунов Роман Вячеславович, директор Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН. Куратор группы от региона — проф. Теймуров Абдулгамид Абдулкасумович, заместитель директора института экологии и устойчивого развития Дагестанского государственного университета. Среди экспертов было 12 представителей организаций РАН, включая член-корреспондента РАН Р. А. Ибраева и 6 представителей вузов Минобрнауки. Несмотря на смешанный состав экспертов, консенсус был найден довольно быстро.

В работах П. И. Бухарицина рассмотрен экспертный прогноз УКМ на основе изменений 11-летнего цикла солнечной активности, индексом которой являлись числа Вольфа. Максимум нового 25 цикла ожидается в середине 20-х годов, окончание — в начале 30-х годов. Поскольку этот цикл обещает быть очень близок к предыдущему 24 циклу, то УКМ будет продолжать понижаться, и к концу 25 цикла должен стабилизироваться. При этом, думается, отметка уровня будет ниже, чем в 1977 году, т.е. примерно в диапазоне — 30,5—31 м. Дальше очевидно, наступит начало нового климатического цикла: водность всех рек, впадающих в Каспийское море должна повыситься, соответственно, начнется новый период трансгрессии (подъема уровня) Каспийского моря.

Более детальные количественные оценки возможного падения уровня даны проф. В. Н. Малининым (РГГМУ) в статье «*Станет ли Каспий вторым Аралом?*» (Гидрометеорология и экология, 2022, №69). В ней он показал, что главным фактором падения уровня в текущем столетии является не резкий рост испарения, как это принимается во многих исследованиях, а сток каспийских вод в залив Кара-Богаз-Гол. Дело в том, что в 1992 г. произошло необоснованное разрушение



Рис. 3. Модератор 4 группы экспертов Горбунов Р. В.: Мозговой штурм начался! Командовать парадом буду я.

дамбы через пролив КБГ, вследствие чего поперечное сечение пролива увеличилось примерно в два раза по сравнению с тем, какое было до строительства дамбы. И огромный поток каспийских вод хлынул в з. КБГ.

Вклад стока в з. КБГ в падение УКМ с момента его падения, т.е. с 1996 г. является доминирующим и достигает 72 %, в то время как на долю испарения приходится лишь 14,4 %. Однако при дальнейшем падении уровня на отметке –30,6 м произойдет обнажение коренного ложа в проливе Кара-Богаз-Гол, вследствие чего сток в залив прекратится. Кроме того, следует учесть действие морфометрического фактора, в соответствии с которым существует обратная связь уровня с испарением с его поверхности. С уменьшением уровня и, соответственно, площади моря происходит сокращение объема испарившейся воды, что в свою очередь способствует сокращению падения уровня. Морфометрический фактор дополнительно способствует стабилизации уровня. Под действием морфометрического фактора при малоизменяющихся внешних условиях уровень становится равновесным (уровнем тяготения), т.е. расход и приход воды к морю уравниваются друг друга. Таким образом, с очень большой вероятностью можно считать, что новым уровнем тяготения моря станет отметка –31 м, ниже которой дальнейшее падение уровня становится маловероятным в ближайшие 10—15 лет.

Итак, эксперты 4 группы приняли за основу уровень тяготения –31 м БС на период до 2040—2050 гг. Однако рассматривались и более экстремальные сценарии понижения уровня до отметок минус 35 и 38 м БС и даже возможного повышения уровня до отметки –27 м. Разработанный Проект рабочей группы №4 был доложен на Пленарном заседании по защите групповых проектов и получил одобрение Правительства Республики Дагестан. Это означает, что УКМ на отметке



Рис. 4. Встреча экспертов 4 группы с руководством Морского порта г. Махачкалы.

–31 м будет считаться реперным и именно на него будут ориентированы различные организации и административные органы при разработке мероприятий по адаптации экономики Республики Дагестан к изменениям уровня Каспийского моря.

Следующим этапом Проекта предусматривается официальное утверждение рабочей группы, задачей которой будет:

— разработка научно-обоснованных сценариев ожидаемых изменений уровня Каспийского моря на средне- и долгосрочную перспективу, оценка их влияния на конкретные отрасли экономики Республики Дагестан и предложение мероприятий по адаптации;

— разработка конкретных мер по смягчению последствий изменения уровня Каспийского моря для экономики Республики Дагестан на основе согласованного прогноза развития уровня Каспийского моря на средне- и долгосрочную перспективу.

При этом в качестве ближайшей задачи планируется подготовка и проведение круглого стола «Устойчивое развитие регионов РФ в условиях изменений уровня Каспийского моря» в рамках IV конгресса молодых ученых.

Информация об авторах

Бухарицин Петр Иванович, доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, Астрахань, piter@bukharitsin.com.

Малинин Валерий Николаевич, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, malinin@rshu.ru.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 76

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Подписано в печать 30.09.2024. Выход в свет 07.10.2024. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,3. Тираж 50 экз. Заказ № 1480. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
