



ISSN 3034-4190

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№77

Санкт-Петербург
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 77

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 3034-4190

Санкт-Петербург
РГГМУ
2024

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); **Камболов М. А.**, канд. юрид. наук, вице-президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; **Квинт В. Л.**, д-р экон. наук, проф., главный научный сотр. Центрального экономико-математического института РАН; **Кулешов Ю. В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского по учебной и научной работе; **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., д-р физ.-мат. наук — *зам. главного редактора*
Гайдукова Е. В., канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*
Алексеев Г. В., д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Биденко С. И.**, д-р техн. наук, проф.; **Блиновская Я. Ю.**, д-р техн. наук, проф.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вуглинский В. С.**, д-р геогр. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Ермаков Д. М.**, д-р физ.-мат. наук; **Зиновьев А. Т.**, д-р техн. наук; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Костяной А. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Кудрявцев В. Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Курашов Е. А.**, д-р биол. наук, проф.; **Лобанов В. А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мохов И. И.**, д-р физ.-мат. наук, академик РАН; **Мушкет И. И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Прошутинский А. Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Репина И. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Румянцев В. А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябенко В. А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С. П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Тимофеев Ю. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Филатов Н. Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Чернышков П. П.**, д-р геогр. наук, проф.; **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Якушев Д. И.**, д-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 3034-4190

Журнал входит в Перечень ВАК по направлению науки о Земле и окружающей среде, имеет категорию K2, индексируется в системе CrossRef и включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Полнотекстовые версии опубликованных статей в виде pdf-файлов размещаются в Интернете для свободного доступа на сайте журнала <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> сразу же после его выхода.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Вороневская 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

№ 77

A theoretical research journal

*Published since October, 2005
4 issues a year*

ISSN 3034-4190

St. Petersburg
RSHU
2024

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 77. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2024. 166 p.

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

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

The Editorial Board:

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; **Kholmazhanov 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; **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*
Kondratyev S. A., Grand PhD in Physics and Mathematics — *Deputy Editor in Chief*
Gaidukova E. V., PhD in Engineering — *Executive editor*
Alekseev G. V., Grand PhD in Geography, Professor; **Belonenko T. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Bidenko S. I.**, Grand PhD in Engineering sciences, Professor; **Chernyshkov P. P.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Ermakov D. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Filatov N. N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Ivanov V. V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kostyanov A. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V. N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kurashov E. A.**, Grand PhD in Biology, Professor; **Lobanov V. A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mokhov I. I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Mushket I. I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Proshutinskiy A. Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Repina I. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Rumyantsev V. A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S. P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Timofeev Iu. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shchukin G. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Vuglinsky V. S.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Zinoviev A. T.**, Grand PhD in Engineering Sciences; **Yakushev D. I.**, Grand PhD in Engineering, Professor; SPU MI.

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

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

Certificate 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 3034-4190

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

Гидрология

- А. Т. Зиновьев, О. В. Кондакова, А. В. Дьяченко, А. Н. Семчуков.*
 Моделирование и прогнозирование уровня воды бессточного озера Чаны. . . 607
- М. В. Георгиевский, С. С. Чепикова, А. В. Терехов, Э. Э. Казаков.* Методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды рек Ленинградской области и Камчатского края с использованием автоматизированной информационной системы (АИС) 626
- А. В. Сикан, Д. А. Щеглов.* Оценка стандартных ошибок выборочных коэффициентов вариации и асимметрии при анализе гидрологических рядов 645

Океанология

- С. В. Горовой, А. В. Кирьянов, Я. Ю. Блиновская, А. А. Борейко, Д. А. Пестов.*
 Экспериментальные исследования шумовых характеристик судов в акватории порта Владивосток 661
- Д. Х. Мартина-Васкес, С. М. Гордеева, В. Н. Малинин.* Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга 674

Метеорология. В порядке дискуссии

- В. А. Молодых.* О 18,6-летних колебаниях температуры воздуха в западной части Северной Америки 689

Экология

- Д. Г. Левшин, М. А. Запезалов, А. И. Бурков.* Распределение полихлорированных бифенилов в системе почва–атмосфера на южном побережье озера Байкал 716

Геоинформатика. Обзор

- С. Е. Максимова, С. В. Духин.* Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям 739

Хроника. История. Персоналии

- А. О. Волгушева.* Военные и трудовые будни гидрологов и метеорологов в период блокады Ленинграда на основе мемуаров сотрудников Гидрологического института (1941—1944 гг.). 750
- К столетнему юбилею Аркадия Павловича Алексева 758
- I Международный Научно-образовательный Форум «Арктический Научный Диалог» (Asd2024 — Arctic Scientific Dialogue) (г. Санкт-Петербург, 14—15 ноября 2024 г.) 761

Contents

Hydrology

- A. T. Zinoviev, O. V. Kondakova, A. V. Dyachenko, A. N. Semchukov.* Modeling and forecasting water level of closed Lake Chany 607
- M. V. Georgievsky, S. S. Chepikova, A. V. Terekhov, E. E. Kazakov.* Methodology of short—term water levels (discharges) forecast of rivers in Leningrad and Kamchatka regions using an automated information system (AIS) 626
- A. V. Sikan, D. A. Shcheglov.* Estimation of standard errors of sample coefficients of variation and asymmetry in the analysis of hydrological series. 645

Oceanology

- S. V. Gorovoy, A. V. Kiryanov, Y. Yu. Blinovskaya, A. A. Boreyko, D. A. Pestov.* Experimental studies of the noise characteristics of ships in the waters of the port of Vladivostok. 661
- J. J. Martina-Vasquez, S. M. Gordeeva, V. N. Malinin.* Statistical modeling and forecasting of anchovy catch in the peruvian upwelling area. 674

Meteorology. Discussion

- V. A. Molodykh.* On 18.6-year air temperature oscillations in the western part of North America 689

Ecology

- D. G. Levshin, M. A. Zapevalov, A. I. Burkov.* Distribution of polychlorinated biphenyls in the soil—atmosphere system on the southern coast of Lake Baikal 716

Geoinformatics. Review

- S. E. Maksimova, S. V. Duhin.* Geoinformation approach to constructing an optimal route for an unmanned aerial vehicle taking into account meteorological restrictions 739

- Chronicle. Story. Personalies** 750

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 607—625.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):607—625.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.555.2(571.14)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-607-625

Моделирование и прогнозирование уровня воды бессточного озера Чаны

***Александр Тимофеевич Зиновьев, Ольга Владимировна Кондакова,
Александр Владимирович Дьяченко, Александр Николаевич Семчуков***

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН), Барнаул, Россия, kondakova.o.v@mail.ru

Аннотация. В работе приведены результаты компьютерного моделирования уровня воды крупного бессточного озера Чаны. Проведены сопоставительные расчеты температуры и уровня воды оз. Чаны в безледоставный период по двум термогидродинамическим моделям, плановой и нульмерной. Установлено, что учет неравномерности распределения температуры по акватории оз. Чаны позволяет уточнить величину испарения с водной поверхности и более точно рассчитать уровень озера. Выполнены моделирование уложенного режима за многолетний период и прогноз уровня оз. Чаны в XXI веке при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков в соответствии со сценариями изменения климата семейства RCP с применением нульмерной модели. Результаты прогноза показали, что в середине и конце XXI века следует ожидать значительного снижения уровня озера, что негативно отразится на его экологическом состоянии.

Ключевые слова: уровень воды, температура воды, испарение, изменение климата, компьютерное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (Проект № 0306-2021-0002).

Для цитирования: Зиновьев А. Т., Кондакова О. В., Дьяченко А. В., Семчуков А. Н. Моделирование и прогнозирование уровня воды бессточного озера Чаны // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 607—625. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-607-625.

Original article

Modeling and forecasting water level of closed Lake Chany

*Alexander T. Zinoviev, Olga V. Kondakova,
Alexander V. Dyachenko, Alexander N. Semchukov*

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS (IWEP SB RAS), Barnaul, Russia, kondakova.o.v@mail.ru

Summary: The largest natural water body in Western Siberia — closed Lake Chany, is of great importance in terms of ecology and fisheries. A natural feature of the lake is the cyclic fluctuations of its water level and water surface area. The water level regime of Lake Chany is the driving factor influencing its ecological state. The lake has a complex basin structure and consists of several parts varying in depth (Fig. 1). In September 1971, the western shallow Yudinsky Reach was separated to preserve the fishery value of the lake. After separation (1972—2022), the average area of the lake made up 1620 km².

The paper presents the results of computer-based modeling of the Lake Chany water level. For simulation, we used a two-dimensional horizontal (2DH) thermohydrodynamic model based on the Delft3D FM software package and a zero-dimensional (0D) hydro-ice-thermal model (IWEP SB RAS).

Two models-based comparative modeling of thermal and level regimes of Lake Chany during the ice-free period demonstrates better agreement of 2DH calculation results with measurement data. It is found that the allowed for uneven temperature distribution across the lake area in the 2DH model make it possible to specify the amount of evaporation from the water surface, which significantly depends on water temperature. Therefore, it allows us to calculate the lake level more accurately and introduce a correction into evaporation estimations in the 0D model.

The results of 0D model-based modeling (with account of correction for evaporation) of long-term fluctuations of the Lake Chany level suggest good correlation with observational data. Thus, the 0D model adequately reproduces the main features of the level regime of Lake Chany for a long-term period, and can be used in prediction of its level in conditions of climate change.

The forecast of the average long-term water level of Lake Chany under future climate changes (i.e. air temperature and precipitation) was made in accordance with the RCP scenarios for the first time. In the 21st century, a significant drop in the average annual level of Lake Chany, having negative effect on its ecosystem, is expected.

Keywords: water level, water temperature, evaporation, climate change, computer modeling.

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the Research Program of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Project № 0306-2021-0002).

For citation: Zinoviev A.T., Kondakova O. V., Dyachenko A.V., Semchukov A. N. Modeling and forecasting water level of closed Lake Chany. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):607—625. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-607-625.

Введение

Озеро Чаны, расположенное в бессточной области Обь-Иртышского междуречья, является крупнейшим естественным водным объектом Западной Сибири и имеет важное рыбохозяйственное и экологическое значение [1—3]. Природной особенностью озера Чаны является цикличность колебаний его уровня и площади водной поверхности, обусловленная изменчивостью общей увлажненности территории Обь-Иртышского междуречья [1—5].

Уровенный режим оз. Чаны является одним из важнейших факторов, влияющих на его водно-экологическое состояние. Колебания уровня и связанное с ними изменение солености воды оказывают существенное влияние на функционирование озерных биоценозов [1—3, 6—8]. Важное значение уровенный режим оз. Чаны имеет и для хозяйственной деятельности в его бассейне, поскольку озеро является водоемом промыслового рыболовства [1—3]. При снижении уровня воды в озере происходит уменьшение объемов улова. В период ледостава при уровнях ниже критической отметки 105,7 м БС (105,5 м БС-77 [10]) происходят обширные заморы рыбы [1]. Такие понижения уровней наблюдались в 1930—40-х гг., в периоды 1967—1971 гг., 1976—1968 гг., 1981—1985 гг., 1991—1993 гг. и в 1996 г.

Озеро Чаны (Чановская озерная система) имеет сложную плановую конфигурацию и состоит из нескольких частей, различных по глубине (рис. 1). На протяжении последних столетий лесостепные и степные пространства, среди которых расположено оз. Чаны, постепенно усыхают. В последней четверти XVIII в. площадь озер Чановской озерной системы достигала 10—12 тыс. км², в начале XIX в. составляла 5,0—5,5 тыс. км², в начале XX в. — около 3000 км², а к 1960 г. снизилась до 2300 км² [4]. Для сохранения рыбохозяйственного значения озера в сентябре 1971 г. системой дамб был отделен западный мелководный Юдинский плес, что позволило создать условия для повышения уровня в оставшейся его части за счет сокращения потерь на испарение и распределения на меньшую площадь притока рек Каргат и Чулым, впадающих в оз. Малые Чаны [3]. Площадь озера после отделения Юдинского плеса (за 1972—2022 гг.) в среднем составила 1620 км² (при среднемноголетнем уровне воды 106,12 м БС-77) с колебаниями от 1285 км² (при уровне воды 105,19 м БС-77) до 2023 км² (при 107,43 м БС-77). Площадь водосборного бассейна озера Чаны — 27 340 км² [1].

Уровень воды в озере определяется соотношением приходных и расходных статей его водного баланса. Приходными составляющими водного баланса оз. Чаны являются атмосферные осадки и речной приток, расходной статьёй — испарение с поверхности озера [1—4, 9—13]. Для бессточных мелководных озер, каким является оз. Чаны, потери воды на испарение весьма значительны [9] и существенно зависят от температуры водной поверхности [3—4].

Озеро Чаны является одним из наиболее изученных водоемов Западной Сибири [2]. Подробное описание основных этапов изучения озера (начиная с XVIII века) и обзор опубликованных работ, посвященных озеру Чаны, выполнено в [2, 3]. Исследование уровенного режима и водного баланса оз. Чаны после отделения Юдинского плеса приведено в работах [1—5, 9—10 и др.].

Годовые величины компонентов водного баланса оз. Чаны после отделения Юдинского плеса (за период 1971—2018 гг.) в среднем составили: речной приток — 298 мм или 0,47 км³ (48% от приходной части), атмосферные осадки на поверхность озера — 324 мм или 0,51 км³ (52%); испарение — 571 мм или 0,90 км³ [19].

Эффективным инструментом исследования изменения водного баланса и уровенного режима водоемов под влиянием различных факторов является математическое моделирование. Ранее выполнялось моделирование среднегодовых

значений уровня воды оз. Чаны с использованием разных математических моделей В. А. Понько и Н. Н. Завалишиным [11], В. П. Галаховым [12], М. В. Болговым и Е. А. Коробкиной [13]. В. А. Понько и Н. Н. Завалишин разработали фоновую модель уровня озера Чаны, в основу которой положена гипотеза многофакторной космической природы изменчивости гидрометеорологических процессов [11], В. П. Галахов предложил имитационную модель водного баланса водоема, включающую модель формирования стока выпадающих в озеро рек [12], М. В. Болгов и Е. А. Коробкина — стохастическую модель колебаний основных компонент водного баланса озера [13].

В данной работе моделирование уровня воды оз. Чаны выполнялось на внутригодовом, суточном и внутрисуточном масштабах времени с применением компьютерных моделей разной размерности, включающих, кроме водного баланса, тепловой баланс водоема.

Цель данной работы — прогноз уровня воды озера Чаны в XXI веке в условиях климатических изменений на основе методов математического моделирования.

Задачи исследования:

1. Сопоставительное моделирование термического режима и уровня воды озера в период открытой воды с применением компьютерных моделей разной размерности: двумерной горизонтальной (2DH) и нульмерной (0D).
2. Моделирование уровня озера за многолетний период с применением 0D-модели.
3. Долгосрочный прогноз уровня озера Чаны в XXI веке при ожидаемых изменениях климатических характеристик (температуры приземного воздуха и суммы атмосферных осадков) с использованием сценариев семейства RCP [14—16].

Методы и материалы

Для компьютерного моделирования использовались построенные в ИВЭП СО РАН двумерная горизонтальная (плановая) [17—20] и нульмерная (объемная) модели [21].

Плановая термогидродинамическая (ТГД) модель с нерегулярной расчетной сеткой, позволяющая выполнять расчеты для безледоставного периода, построена на базе программного комплекса с открытым исходным кодом Delft3D FM [22].

В основе используемой в работе модели лежат уравнения Сен-Венана (уравнения движения для компонент горизонтальной скорости течения и уравнение неразрывности), дополненные уравнением переноса тепла и уравнением состояния [22]. 2DH-модель предусматривает осреднение гидрофизических параметров по глубине и описывает изменение во времени распределения течений и температуры воды по акватории водоема, обусловленное сложным строением озерной котловины, влиянием речного притока и взаимодействием с атмосферой. Тепловой поток через свободную поверхность воды и интенсивность испарения вычисляются по модели «Ocean» [22].

Нульмерная гидроледотермическая модель представляет собой модель с сосредоточенными параметрами, основанную на совместном решении уравнений

водного и теплового балансов, и позволяет описывать ход основных гидрологических процессов в водоеме с учетом возникновения ледового и снежного покровов в течение холодного периода года [21].

Уравнение водного баланса имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{dT} = \sum_{i=1}^N Q_i + q_a \Omega,$$

где t — время, ч, V — объем воды в водоеме, м^3 , N — число учитываемых речных притоков, Q_i — расходы этих притоков, $\text{м}^3/\text{ч}$, Ω — площадь поверхности водоема, м^2 , q_a — массообмен через единицу площади свободной поверхности водоема при отсутствии снежно-ледового покрова или поверхности раздела воды и льда при его наличии, $\text{м}/\text{ч}$.

Массообмен определяется соотношением:

$$q_a = \begin{cases} q_{pr} - q_{ev} & \text{при } \theta_{ice} = 0 \\ -q_f & \text{при } \theta_{ice} > 0 \end{cases}$$

где θ_{ice} — толщина льда, м, q_{pr} — интенсивность атмосферных осадков, $\text{м}/\text{ч}$, q_{ev} — интенсивность испарения, $\text{м}/\text{ч}$, q_f — интенсивность массообмена между водоемом и снежно-ледовым покровом, $\text{м}/\text{ч}$.

Уровень и соответствующая ему площадь поверхности водоема вычисляются как функции объема по батиграфическим кривым, после чего для уровня делается поправка на вытеснение воды льдом и снегом:

$$z = z^*(V) + \theta_{ice} \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} + \theta_s \frac{\rho_s}{\rho_w},$$

где z — уровень свободной поверхности водоема, м, $z^*(V)$ — уровень, вычисленный исходя из объема воды подо льдом, м, θ_s — толщина снега на льду, м, ρ_w , ρ_{ice} и ρ_s — плотность воды, льда и снега, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Уравнение теплового баланса водоема имеет следующий вид:

$$\frac{d(VT_w)}{dT} = \sum_{i=1}^N Q_i T_i + \frac{\Omega \Phi}{c_w \rho_w},$$

где T_w — температура воды, $^\circ\text{C}$; Φ — поток тепла через единицу площади свободной поверхности водоема, включая конвективный поток тепла с испаряющейся водой и осадками, при отсутствии ледового покрова или поверхности раздела воды и льда при его наличии, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; c_w — удельная теплоемкость воды, $\text{кал}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$; T_i — температура воды в i -м речном притоке, $^\circ\text{C}$.

Теплообмен с атмосферой и интенсивность испарения рассчитываются по методике Харлемана [23]. Изменение толщины снежного и ледового покровов вычисляется на основе методики Харлемана-Руммера [23, 24].

Таким образом, в обеих моделях при расчете водного баланса учитываются приход воды с речным притоком и атмосферными осадками на поверхность озера и потери воды на испарение, при расчете теплового баланса — поступление тепла с водой речных притоков и теплообмен с атмосферой. При этом учитываются

солнечная радиация, длинноволновая радиация атмосферы и водной поверхности, потоки тепла, обусловленные испарением и атмосферной конвекцией, перенос тепла испаряющейся водой и атмосферными осадками. Теплообмен с дном считается пренебрежимо малым и не учитывается. Плотность воды в обеих моделях определяется по формуле UNESCO [21, 22].

Для хранения и подготовки исходных данных для расчетов создана база данных [17—19] на основе СУБД PostgreSQL [25], содержащая метеорологическую и гидрологическую информацию по озеру Чаны и его притокам. Источниками данных являлись ежегодные издания Государственного водного кадастра «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» и метеорологические ежемесячники за 2001—2018 гг., а также интернет-ресурсы: «Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО)» (<https://gmvo.skniivh.ru>) и «Расписание погоды» (<https://tp5.ru>) за 2014 г. и 2018 г.

Входными данными для расчетов являлись расходы и температура воды впадающих в озеро рек Каргат и Чулым (по постам Здвинск и Старогорностаево) и метеорологические параметры (атмосферные осадки, температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление, общая облачность, скорость ветра и дополнительно для 2DH-модели — направление ветра). Для сопоставительных расчетов по двум моделям использована детальная метеорологическая информация с трехчасовой дискретностью по станции Квашнино. Для расчетов за длительный период по 0D-модели для всех параметров (кроме атмосферных осадков) задавались среднемесячные значения по станции Квашнино, для атмосферных осадков — по постам Квашнино, Таган, Городище и Яркуль. В начальный момент времени задавались уровень и температура воды в озере.

Также для численных расчетов использована цифровая модель рельефа котловины оз. Чаны, созданная в ИВЭП СО РАН [10] и впоследствии адаптированная для построения 2DH-модели озера [17—19] (рис. 1). В расчетах по 0D-модели учитывались общие зависимости площади водной поверхности и объема воды в озере от уровня воды, полученные по данным ЦМР.

Результаты исследований

Выполнены сопоставительные расчеты термического и уровенного режимов оз. Чаны в безледоставный период по двум моделям, моделирование уровенного режима за многолетний период и прогноз уровня оз. Чаны в XXI веке в условиях изменения климата с применением 0D-модели.

Моделирование термического и уровенного режимов в безледоставный период

Ранее, на примере 2018 г., было показано, что 2DH-модель позволяет описывать термический режим оз. Чаны, неравномерное распределение температуры воды по акватории озера [17—18] и динамику изменения уровня воды в безледоставный период [19—20].

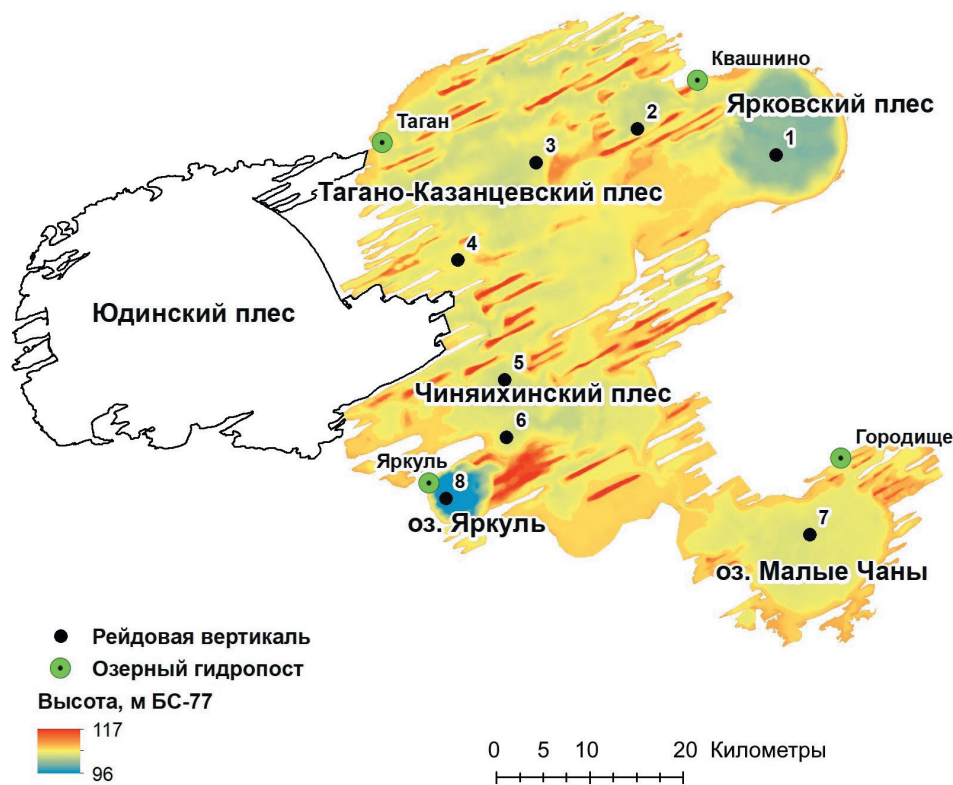


Рис. 1. Цифровая модель рельефа котловины оз. Чаны и схема расположения пунктов наблюдений.

Fig. 1. Digital elevation model of the Lake Chany basin and location scheme of observation points.

В данной работе выполнены сопоставительные расчеты термического и уровня режимов оз. Чаны в безледоставный период по 2ДН и 0D-моделям для 2014 г. и 2018 г. Эти годы выбраны как наиболее обеспеченные гидрометеорологической информацией. В табл. 1 приведены значения уровня воды, площади водной поверхности, объема и средней глубины озера, осредненные за расчетный период.

Таблица 1

Морфометрические характеристики озера Чаны в 2014 г. и 2018 г.
(средние значения за расчетный период с 15 мая по 27 октября)
Morphometric characteristics of Lake Chany in 2014 and 2018
(average values for the calculation period from May 15 to October 27)

Год	Уровень средний по постам, м БС-77	Площадь, км ²	Объем, км ³	Средняя глубина, м
2014	106,21	1764	3,31	1,88
2018	106,72	1921	4,27	2,22

Для расчетов по 2DH-модели использованы метеоданные с трехчасовой дискретностью, по 0D-модели — их среднесуточные значения. Расходы воды в обеих моделях задавались среднесуточные, а температура воды рек — среднедекадная. Расчетный период выбран с 13:00 ч. 15 мая по 13:00 ч. 27 октября. В данной работе расчеты выполнялись без учета солёности. В указаниях [26] для водоемов с содержанием солей менее 25—30 г/л рекомендуется рассчитывать испарение с водной поверхности как для пресных водоемов.

Анализ результатов сопоставительного моделирования термического режима оз. Чаны в безледоставный период для 2014 г. и 2018 г. показал, что значения температуры воды на мелководных участках, рассчитанные по двум моделям, достаточно близки между собой (рис. 2). Однако на более глубоких участках температура воды, рассчитанная по 0D-модели, в весенний период существенно выше, в осенний — несколько ниже, чем температура по 2DH-модели (рис. 3).

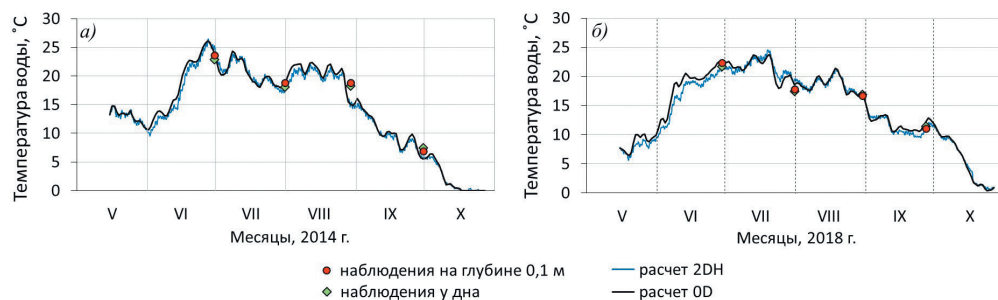


Рис. 2. Температура воды оз. Чаны на рейдовой вертикали 3:

a — в 2014 г., *б* — в 2018 г.

Fig. 2. The Lake Chany water temperature on the raid vertical 3:

a — in 2014, *б* — in 2018.

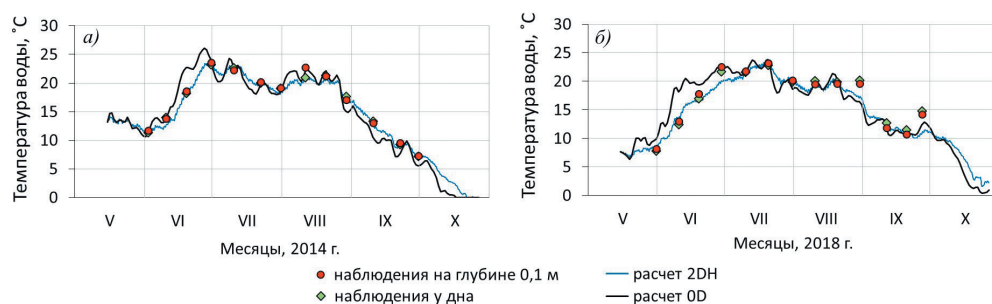


Рис. 3. Температура воды оз. Чаны на рейдовой вертикали 1:

a — в 2014 г., *б* — в 2018 г.

Fig. 3. The Lake Chany water temperature on the raid vertical 1:

a — in 2014, *б* — in 2018.

Это объясняется тем, что в 0D-модели не учитывается сложное строение озерной котловины и наличие плесов, различных по глубине, а используется общая зависимость объема воды в озере от уровня воды.

Завышение температуры воды в июне-июле по 0D-расчетам обуславливает более высокие величины испарения, что, соответственно, приводит к занижению уровня воды по сравнению с результатами расчетов по 2DH-модели и данными наблюдений (рис. 5).

Таким образом, сопоставление результатов, полученных по двум моделям, позволило внести поправку в расчеты испарения в 0D-модели и, следовательно, более точно рассчитать уровень озера в безледоставный период (табл. 2—3, рис. 4). В табл. 2 приведены сопоставление объема и слоя испарения (Е) с поверхности воды за расчетный период по двум моделям и величина превышения испарения (ΔE) в 0D-модели по отношению к величине в 2DH-модели. Показано, что введенная поправка обусловила снижение испарения, рассчитанного по 0D-модели, на 7%.

В табл. 3 приводятся оценки расхождений рассчитанных уровней и данных наблюдений по величине среднеквадратического отклонения RMSE (Root Mean Square Error) по отношению к средней глубине озера за рассматриваемый период года (табл. 1).

Таблица 2

Испарение (Е) с водной поверхности оз. Чаны (за период с 15 мая по 27 октября)

Evaporation (E) from the water surface of Lake Chany
(during the period from May 15 to October 27)

Модель	2014 г.			2018 г.		
	Е		ΔE^* , %	Е		ΔE^* , %
	км ³	мм		км ³	мм	
2DH-модель	0,83	469	—	0,90	470	—
0D-модель без поправки	1,07	605	+29	1,11	578	+23
0D-модель с поправкой	1,01	567	+22	1,03	538	+15

Примечание: * — по отношению к испарению по 2DH-модели.

Таблица 3

Оценка качества моделирования уровня оз. Чаны по величине среднеквадратического отклонения (RMSE) (по отношению к средней глубине озера)

Quality evaluation of the results of the Lake Chany water level modeling based on root mean square error (RMSE) (relative to the average depth of the lake)

Год	2DH-модель										0D-модель			
	Посты								Средний по постам		Без поправки		С поправкой	
	Квашнино		Городище		Таган		Яркуль							
	см	%	см	%	см	%	см	%	см	%	см	%	см	%
2014	7,2	3,8	4,5	2,4	5,1	2,7	3,3	1,8	3,6	1,9	4,7	2,5	3,1	1,7
2018	5,6	2,5	5,5	2,5	8,8	4,0	4,3	1,9	3,0	1,4	3,2	1,7	2,3	1,2

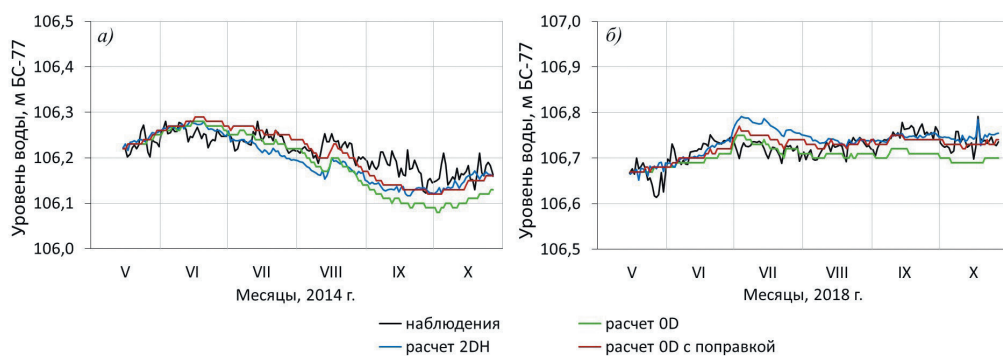


Рис. 4. Уровень оз. Чаны (средний по озеру):

a — в 2014 г., *б* — в 2018 г.

Fig. 4. The Lake Chany water level (averaged over the lake):

a — in 2014, *б* — in 2018.

Возможными источниками неопределенности и ошибок моделирования температурного и уровня режимов оз. Чаны могут являться:

- использование данных о притоках по гидрологическим постам, расположенных на достаточно значительных расстояниях от их устьев;
- задание значений метеопараметров одинаковыми по всей акватории озера;
- осреднение температуры воды по глубине в 2DH-модели и по объему воды в 0D-модели, что обуславливает отличие рассчитанных значений от фактической температуры поверхности воды.

В качестве возможных путей минимизации ошибок моделирования могут быть рассмотрены:

- учет приточности с территории водосборного бассейна ниже водомерных постов с использованием моделей формирования поверхностного стока;
- задание распределенной метеорологической информации, которая может быть получена путем пространственной интерполяции по данным метеостанций, находящихся в районе озера (Купино, Чаны, Барабинск и др.);
- применение трехмерных ТГД-моделей, позволяющих более точно рассчитывать температуру поверхности воды и величину испарения.

Моделирование многолетних колебаний уровня воды

С учетом введенной поправки в расчеты испарения с применением 0D-модели выполнено моделирование колебаний уровня воды за многолетний период 2001—2018 гг. [20]. В качестве входных данных задавались среднемесячные значения гидрологических и метеорологических характеристик.

Получено хорошее соответствие результатов моделирования данным наблюдений (рис. 5). Среднеквадратическое отклонение (RMSE) для среднемесячных значений уровня воды составило 8,2 см (4,1 % по отношению к средней глубине

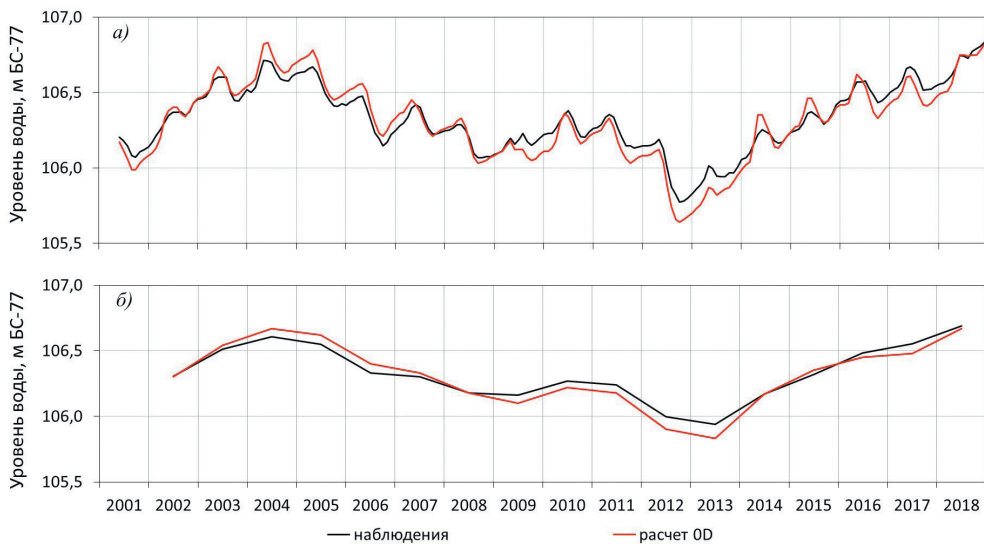


Рис. 5. Результаты моделирования уровня воды оз. Чаны за 2001—2018 гг.:

а — среднемесячные значения, *б* — среднегодовые значения.

Fig. 5. The results of modeling of the Lake Chany level for 2001—2018:

a — monthly average values, *b* — annual average values.

озера за рассматриваемый период 2,0 м), для среднегодовых значений — 7,1 см (3,5 %).

Таким образом, 0D-модель позволяет воспроизводить основные черты уровня оз. Чаны за многолетний период и может применяться для прогнозирования уровня озера под влиянием климатических изменений.

Оценки изменения уровня оз. Чаны в XXI в.

Выполнена оценка возможных изменений среднего многолетнего уровня воды оз. Чаны в XXI в. с учетом региональных изменений климата по сценариям семейства RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) проекта CMIP5 [14—16] с применением 0D-модели.

На территории Российской Федерации прогнозируемое потепление климата в XXI в. может существенно превысить среднее глобальное потепление, при этом наибольший рост приземной температуры ожидается зимой [14—16, 27—28].

Для территории, прилегающей к оз. Чаны, оценка ожидаемых изменений климатических характеристик (температуры приземного воздуха и суммарных атмосферных осадков) в XXI веке выполнена по картам прогнозируемых изменений на территории РФ [14—16]. Определены диапазоны возможных изменений сезонных и годовых величин рассматриваемых характеристик в бассейне оз. Чаны в начале (2011—2030 гг.), середине (2041—2060 гг.) и в конце

(2080—2099 гг.) XXI века по отношению к базовому климатическому периоду 1981—2000 гг. (табл. 4—5).

Таблица 4

Ожидаемые изменения температуры приземного воздуха (°C) по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. по сценариям RCP проекта CMIP5 на территории, прилегающей к оз. Чаны

Projected changes in seasonal and annual mean surface air temperature (°C) relative to the base period 1981—2000 under CMIP5 RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany

Прогнозный период, годы	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
<i>Сценарий RCP2.6</i>					
2011—2030	1,5—2,0	1,5—2,0	1,0—1,5	1,0—1,5	1,5—2,0
2041—2060	2,5—3,0	2,5—3,0	2,0—2,5	2,0—2,5	2,0—2,5
2080—2099	2,5—3,0	2,0—2,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,0—2,5
<i>Сценарий RCP4.5</i>					
2011—2030	1,5—2,0	1,5—2,0	1,0—1,5	1,0—1,5	1,0—1,5
2041—2060	3,0—3,5	3,0—3,5	2,0—3,0	2,5—3,0	2,5—3,0
2080—2099	4,0—5,0	3,5—4,0	3,0—3,5	3,0—3,5	3,5—4,0
<i>Сценарий RCP8.5</i>					
2011—2030	1,5—2,5	1,5—2,0	1,0—1,5	1,0—2,0	1,5—2,0
2041—2060	4,0—5,0	3,5—4,0	3,0—3,5	3,0—3,5	3,5—4,0
2080—2099	8,0—9,0	5,0—7,0	6,0—7,0	5,0—7,0	5,0—7,0

Таблица 5

Ожидаемые изменения количества сезонных и годовых атмосферных осадков (в %) по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. по сценариям RCP проекта CMIP5 на территории, прилегающей к оз. Чаны

Projected changes in seasonal and annual mean precipitation amounts (%) relative to the base period 1981—2000 under CMIP5 RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany

Прогнозный период, годы	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
<i>Сценарий RCP2.6</i>					
2011—2030	10—15	5—10	5—10	5—10	5—10
2041—2060	10—15	10—15	0—5	5—10	5—10
2080—2099	10—15	10—15	5—15	5—15	5—15
<i>Сценарий RCP4.5</i>					
2011—2030	10—15	5—10	0—5	5—10	5—10
2041—2060	15—20	10—15	5—10	5—10	5—10
2080—2099	20—35	15—20	5—10	10—15	10—15
<i>Сценарий RCP8.5</i>					
2011—2030	10—15	5—10	0—5	5—10	5—10
2041—2060	20—30	10—15	0—5	10—15	10—15
2080—2099	35—40	20—30	0—5	15—20	15—20

К концу XXI в. ожидаемое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха на территории, прилегающей к оз. Чаны, (рис. 6) относительно базового периода составит по наиболее оптимистичному сценарию RCP2.6 2,0—2,5 °C, по умеренному сценарию RCP4.5 — 3,5—4,0 °C, по сценарию RCP8.5, соответствующему максимальным антропогенным выбросам, — 5,0—7,0 °C (рис. 6). Прогнозируемое увеличение годовой суммы атмосферных осадков (рис. 7) по отношению к базовому периоду составит 5—10 % (по сценарию RCP2.6), 10—15 % (RCP4.5) и 15—20 % (RCP8.5). Средние значения рассматриваемых характеристик отнесены к серединам прогнозных периодов (рис. 6—7).

Ранее в [20] была выполнена предварительная оценка снижения уровня озера Чаны для средних значений рассматриваемых климатических характеристик по сценариям RCP4.5 и RCP8.5. В данной работе проведены варианты расчетов возможных изменений среднего годового уровня воды озера Чаны для минимальных, максимальных и средних значений диапазонов возможных изменений температуры воздуха и атмосферных осадков для сценариев RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Расчеты выполнены для периода с 1991 г. по 2089 г. (между серединами базового (1981—2000 гг.) и прогнозного (2080—2099 гг.) периодов).

Полученные результаты показали, что для всех рассматриваемых вариантов расчетов в XXI в. следует ожидать значительного снижения уровня воды оз. Чаны (рис. 8), что негативно отразится на экосистеме озера. По всем сценариям

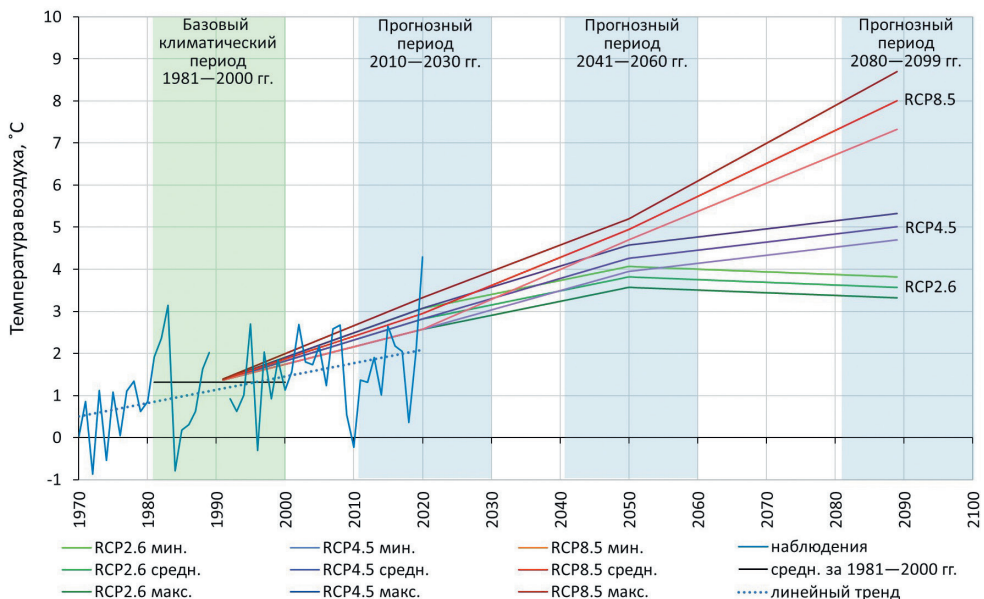


Рис. 6. Ожидаемые изменения среднегодовой температуры приземного воздуха по сценариям RCP на территории, прилегающей к оз. Чаны.

Fig. 6. Projected changes in annual mean surface air temperature under RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany.

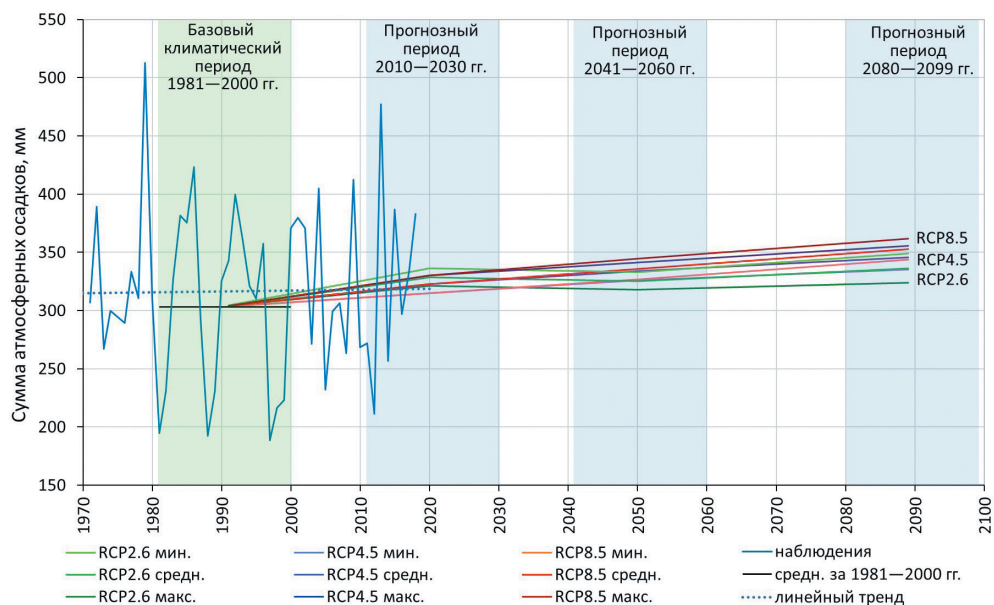


Рис. 7. Ожидаемые изменения количества годовых атмосферных осадков по сценариям RCP на территории, прилегающей к оз. Чаны.

Fig. 7. Projected changes in annual precipitation amount under RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany.

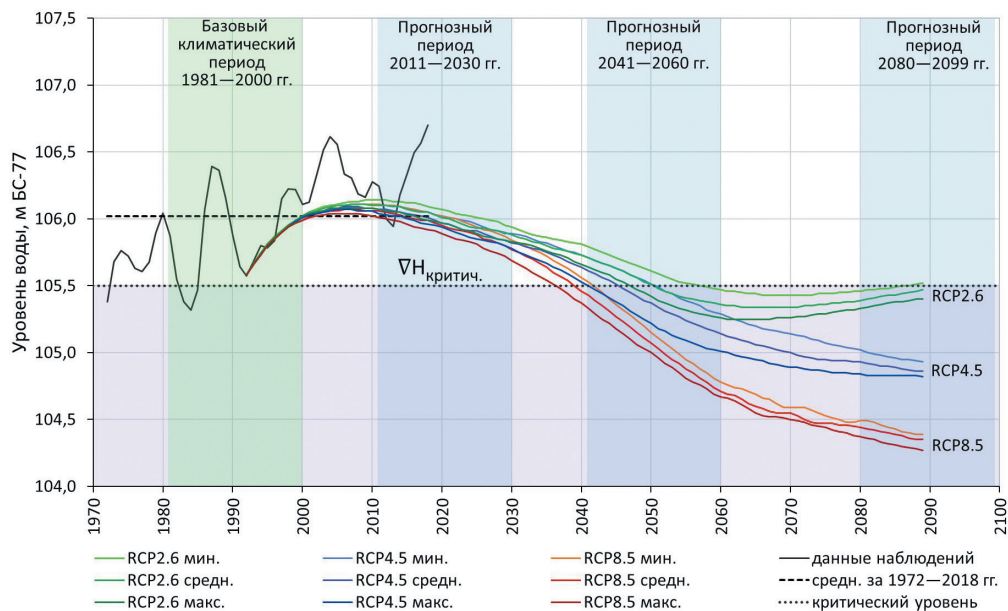


Рис. 8. Оценка возможных изменений уровня воды оз. Чаны в XXI в.

Fig. 8. Assessment of possible changes in the Lake Chany water level in the 21st century.

климатических изменений средний годовой уровень воды оз. Чаны может снизиться до критической отметки в середине XXI в. По сценарию RCP2.6, после 2060—2070 гг. уровень воды начнет незначительно повышаться. В расчетах по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 во второй половине века уровень продолжит снижаться и ближе к концу века по рассматриваемым вариантам расчетов может составить 104,82—105,93 и 104,27—104,39 м БС-77, соответственно, что на 0,57—0,68 м и 1,10—1,23 м ниже критического значения.

Заключение

Сопоставительное моделирование термического и уровенного режимов оз. Чаны в безледоставный период с применением 2DН и 0D-моделей показало, что результаты расчетов по плановой модели лучше согласуются с данными наблюдений. Установлено, что учет неравномерности распределения температуры по акватории оз. Чаны позволяет уточнить величину испарения с водной поверхности, существенно зависящую от температуры воды, и следовательно, более точно рассчитать изменение уровня озера.

Выполненное моделирование многолетних колебаний уровня воды оз. Чаны с применением объемной гидроледотермической модели водоема (с учетом внешней поправки на испарение) показало хорошее соответствие рассчитанных и фактических значений. Установлено, что 0D-модель воспроизводит основные черты уровенного режима оз. Чаны за многолетний период, что позволяет применять ее для прогнозирования уровня озера при климатических изменениях.

Впервые выполнен прогноз среднемноголетнего уровня воды в оз. Чаны при изменении температуры приземного воздуха и атмосферных осадков в соответствии со сценариями изменения климата семейства RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). Показано, что в XXI веке следует ожидать значительного снижения годового уровня воды оз. Чаны, что вызовет негативные последствия для экосистемы озера.

Результаты исследования могут быть использованы для оценки и прогноза экологического состояния озера Чаны при ожидаемых климатических изменениях и могут быть учтены при планировании хозяйственного использования озера и разработке мероприятий по охране его водных ресурсов.

Список литературы

1. Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) / Отв. ред. О. Ф. Васильев, Я. Вейн. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2015. 255 с.
2. Экология озера Чаны / Под ред. Б. Г. Иоганзена, Г. М. Кривошекова. Новосибирск: Наука, 1986. 270 с.
3. Пульсирующее озеро Чаны / Под ред. Н. П. Смирновой и А. В. Шнитникова. Л.: Наука, 1982. 304 с.
4. Шнитников А. В. Большие озера Срединного региона и некоторые пути их использования / Озера Срединного региона (историческая изменчивость и современное состояние). Л.: Наука, 1976. С. 5—133.
5. Vasil'ev O. F., Savkin V. M., Saprykina Ya. V. Analysis of water level fluctuations in Lake Chany. Doklady Earth Sciences. 2006; 407(3): 446—449. doi: 10.1134/S1028334X06030226.
6. Kipriyanova L. M., Yermolaeva N. I., Bezmaternykh D. M. et al. Changes in the biota of Chany Lake along a salinity gradient // Hydrobiologia. 2007. Vol. 576. № 1. P. 83—93. doi: 10.1007/s10750-006-0295-9.

7. Bezmaternykh D. M. Spatial and temporal organization of benthic macroinvertebrate communities in Lake Chany, Western Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2016. Vol. 47. № 5. P. 480—485. doi: 10.1134/S1067413616050039.
8. Попов П. А. Влияние уровня режима водоемов реки Оби на экологию рыб // *Известия Алтайского отделения Русского географического общества*. 2022. № 2 (65). С. 59—81. doi: 10.24412/2410-1192-2022-16503.
9. Савкин В. М., Орлова Г. А., Кондакова О. В. Современный водный баланс бессточного озера Чаны // *География и природ. ресурсы*. 2006. № 1. С. 123—130.
10. Кондакова О. В., Савкин В. М., Двуреченская С. Я., Марусин К. В. Водный баланс и характеристики минерализации бессточного озера Чаны // *География и природные ресурсы*. 2020. № 1. С. 122—129. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(122-129).
11. Понько В. А., Завалишин Н. Н. Фоновая модель уровня оз. Чаны / Пульсирующее озеро Чаны. Л.: Наука, 1982. С. 60—67.
12. Галахов В. П. Оценка увлажнения юга Западной Сибири (по колебаниям уровня озера Чаны) // *Известия Русского географического общества*. 2012. Т. 144. № 1. С. 59—63.
13. Болгов М. В., Коробкина Е. А. О моделировании колебаний уровня оз. Чаны для управления его гидрологическим режимом // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2012. № 1. С. 4—22.
14. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова и С. М. Семенова. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
15. Катцов В. М., Говоркова В. А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2013. Вып. 569. С. 75—97.
16. Изменения климата России в 21-м веке (модели CMIP5). Режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/index.php/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613> (дата обращения: 05.04.2022).
17. Зиновьев А. Т., Дьяченко А. В., Кондакова О. В. Моделирование термогидродинамических процессов в озере Чаны // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2022. Т. 4. С. 86—92. doi: 10.33764/2618-981X-2022-4-86-92.
18. Зиновьев А. Т., Дьяченко А. В., Кондакова О. В. Моделирование термического режима озера Чаны // *Вопросы географии*. Сб. 157. Водные проблемы и их решение. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. С. 421—432.
19. Зиновьев А. Т., Дьяченко А. В., Кондакова О. В. Моделирование уровня озера Чаны // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2023. Т. 4. № 1. С. 70—76. doi: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-70-76.
20. Зиновьев А. Т., Кондакова О. В., Дьяченко А. В., Семчуков А. Н. Моделирование уровня бессточного озера Чаны (Западная Сибирь) // *Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова (Санкт-Петербург, 05—14 октября 2023 г.)*. СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С. 207—211.
21. Bulk Model of Water Level, Temperature and Salinity Change in a Water Body // *The rehabilitation of the ecosystem and bioproductivity of the Aral Sea under conditions of water scarcity*. INTAS Project — 0511 REBASOWS. Final report. Coordinator: H. P. Nachtnebel. IWHW-BOKU. Vienna — Tashkent, 2006. P. 181—189 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cawater-info.net/library/eng/intas_2006_en.pdf (дата обращения 20.12.2023).
22. Delft3D Flexible Mesh Suite. D-Flow Flexible Mesh. User Manual. Режим доступа: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата обращения 20.12.2023).
23. Rayan P. J., Harleman D. R. F., Stolzenbach K. D. Surface heat loss from cooling ponds // *Water resources research*. 1974. Vol. 10. № 5. P. 930—938. doi: 10.1029/WR010i005p00930.
24. Wake A., Rumer R. R. Modeling ice regime of lake Eria // *Journal of the Hydraulics Division*. 1979. Vol. 105. № 7. P. 827—844. doi: 10.1061/JYCEAJ.0005239.
25. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.postgresql.org> (дата обращения: 20.06.2023).

26. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.
27. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научно-технические технологии, 2022. 676 с.
28. Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А. и др. Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6 // Труды ГГО. 2022. Вып. 604. С. 5—54.

References

1. Vasil'ev O. F., Veen J., eds. Obzor ehkologicheskogo sostoyaniya ozera Chany (Zapadnaya Sibir'). Novosibirsk: Academic Publishing House «GEO»; 2015: 255 p. (In Russ.).
2. Ioganzen B. G., Krivoshchekov G. M., eds. Ehkologiya ozera Chany. Novosibirsk: Nauka; 1986: 270 p. (In Russ.).
3. Smirnova N. P., Shnitnikov A. V., eds. Pul'siruyushchee ozero Chany. Leningrad: Nauka; 1982: 304 p. (In Russ.).
4. Shnitnikov A. V. Large lakes of the Middle Region and some ways to use them. *Ozera Sredinnogo regiona (istoricheskaya izmenchivost' i sovremennoe sostoyanie)*. = *The lakes of the Middle region (historical variability and current status)*. Leningrad: Nauka, 1976: (5—133). (In Russ.).
5. Vasil'ev O. F., Savkin V. M., Saprykina Ya. V. Analysis of water level fluctuations in Lake Chany. *Doklady Earth Sciences*. 2006; 407(3): 446—449. doi: 10.1134/S1028334X06030226.
6. Kipriyanova L. M., Yermolaeva N. I., Bezmaternykh D. M. et al. Changes in the biota of Chany Lake along a salinity gradient. *Hydrobiologia*. 2007; 576(1):83—93. doi: 10.1007/s10750-006-0295-9.
7. Bezmaternykh D. M. Spatial and temporal organization of benthic macroinvertebrate communities in Lake Chany, Western Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2016; 47(5):480—485. doi: 10.1134/S1067413616050039.
8. Popov P. A. Influence of the level regime of reservoirs of the Ob river on the ecology of fish. *Izvestiya Altaiskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*. 2022; 2(65): (59—81). doi: 10.24412/2410-1192-2022-16503. (In Russ.).
9. Savkin V. M., Orlova G. A., Kondakova O. V. The present-day water balance of undrained Lake Chany. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2006; (1): (123—130). (In Russ.).
10. Kondakova O. V., Savkin V. M., Dvurechenskaya S. Ya., Marusin K. V. Water balance and patterns of mineralization of closed Lake Chany. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2020; 41(1): (51—58). doi: 10.1134/S1875372820010072.
11. Pon'ko V. A., Zavalishin N. N. Background model of Lake Chany level. *Pul'siruyushchee ozero Chany = Pulsating Lake Chany*. Leningrad: Nauka, 1982: (60—67). (In Russ.).
12. Galakhov V. P. Assessment of humidity in the south of Western Siberia (based on the fluctuations of the Lake Chany level). *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2012; 144(1): (59—63). (In Russ.).
13. Bolgov M. V., Korobkina E. A. About modeling of level fluctuations of Lake Chany for its hydrological regime management. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2012; (1): (4—22). (In Russ.).
14. Kattsov V. M., Semenov S. M., eds. The second assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Rosgidromet; 2014: 1008 p. (In Russ.).
15. Kattsov V. M., Govorkova V. A. Expected surface air temperature, precipitation and annual runoff changes over the territory of Russia through the XXI century: projections with an ensemble of global climate models (CMIP5). *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2013; (569): (75—97). (In Russ.).
16. Climate Changes in Russia in the 21st Century (CMIP5 Models). Available at: <http://voeikovmgo.ru/index.php/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>. (accessed on: 05.04.2022). (In Russ.).
17. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V. Modeling of thermohydrodynamic processes in Lake Chany. *Interespo Geo-Sibir' = Interexpo GEO-Siberia*. 2022; 4: (86—92). doi: 10.33764/2618-981X 2022-4-86-92. (In Russ.).

18. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V. Modeling of the Lake Chany thermal regime. *Voprosy geografii. Sbornik 157. Vodnye problemy i ikh reshenie = Problems of Geography. Vol. 157. Water problems and their solution*. Moscow: Media-Press, 2023: (421—432). (In Russ.).
19. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V. Modeling of Lake Chany level. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo GEO-Siberia*. 2023; 4(1): (70—76). (In Russ.). doi: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-70-76. (In Russ.).
20. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V., Semchukov A. N. Modeling of water level of closed Lake Chany (Western Siberia). *Pyatye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya v ehpokhu pere-men. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydavushchegosya russko-go uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova = V Vinogradov Conference. Hydrology in the era of change. Book of proceedings of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Vinogradov* (St. Petersburg, 05—14 October 2023). St. Petersburg: VVM Publishing House, 2023 (In Russ.).
21. Bulk Model of Water Level, Temperature and Salinity Change in a Water Body. *The rehabilitation of the ecosystem and bioproductivity of the Aral Sea under conditions of water scarcity. INTAS Project — 0511 REBASOWS. Final report*. Coordinator: H. P. Nachtnebel. IWHW-BOKU. Vienna — Tashkent, 2006: (181—189). Available at: http://www.cawater-info.net/library/eng/intas_2006_en.pdf (accessed on: 20.12.2023).
22. Delft3D Flexible Mesh Suite. D-Flow Flexible Mesh. User Manual. Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (accessed on: 20.12.2023).
23. Rayan P. J., Harleman D. R. F., Stolzenbach K. D. Surface heat loss from cooling ponds. *Water resources research*. 1974: 10(5): (930—938). doi: 10.1029/WR010i005p00930.
24. Wake A., Rumer R. R. Modeling ice regime of lake Eria. *Journal of the Hydraulics Division*. 1979: 105(7):827—844. doi: 10.1061/JYCEAJ.0005239.
25. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. Available at: <https://www.postgresql.org> (accessed on: 20.06.2023).
26. *Guidelines on the calculation of evaporation from the surface of reservoirs*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 84 p. (In Russ.).
27. Kattsov V. M., ed. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Sankt-Peterburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022; 676 p. (In Russ.).
28. Kattsov V. M., Pavlova T. V., Govorkova V. A. et al. Climate change projections over the territory of Russia through the XXI century based on ensemble of CMIP6 models. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2022; (604): (5—54). (In Russ.).

Информация об авторах

Зиновьев Александр Тимофеевич, доктор технических наук, доцент, директор, главный научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, лаборатория гидрологии и геоинформатики, zinoviev@iwer.ru.

Кондакова Ольга Владимировна, младший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Новосибирский филиал, kondakova.o.v@mail.ru.

Дьяченко Александр Владимирович, научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, лаборатория гидрологии и геоинформатики, dychenko@iwer.ru.

Семчуков Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Новосибирский филиал, a.semchukov@inbox.ru.

Information about authors

Zinoviev Alexander Timofeevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director, Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Laboratory of Hydrology and Geoinformatics.

Kondakova Olga Vladimirovna, Junior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Novosibirsk Branch.

Dyachenko Alexander Vladimirovich, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Laboratory of Hydrology and Geoinformatics.

Semchukov Alexander Nikolaevich, PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Novosibirsk Branch.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 13.11.2024

Принята к печати 13.12.2024

The article was received on 13.11.2024

The article was accepted on 13.12.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 626—644.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):626—644.

Научная статья

УДК [556.535.1+556.535.3]:004.9(282.247.2)(282.257.1.29)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-626-644

Методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды рек Ленинградской области и Камчатского края с использованием автоматизированной информационной системы (АИС)

**Михаил Владимирович Георгиевский¹, Светлана Сергеевна Чепикова¹,
Антон Викторович Терехов², Эдуард Эдуардович Казаков³**

¹ Государственный гидрологический институт, mgeorgievsky@hotmail.com

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

³ Независимый исследователь

Аннотация. В статье рассматривается методика прогнозирования уровней (расходов) воды с помощью автоматизированной информационной системы краткосрочных гидрологических прогнозов (АИС), разработанная в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) для рек Ленинградской области (реки Тихвинка, Луга, Тосна и Тигода) и Камчатского края (реки Большая Воровская и Амчигача). В настоящее время технология прогнозирования АИС внедрена в оперативную практику Северо-Западного УГМС. АИС является готовым решением в области информационных технологий, требующим минимального количества исходной информации и времени для развертывания системы. Она имеет хорошие перспективы дальнейшей адаптации для различных речных бассейнов Российской Федерации.

Ключевые слова: методика краткосрочного прогнозирования, автоматическая информационная система, гидрологическое моделирование, автоматическая калибровка гидрологических моделей, реки Ленинградской области и Камчатского края.

Благодарности: работа выполнена в ГГИ в рамках темы Росгидромета 1.1.9 «Разработка и усовершенствование моделей, методов и технологий прогнозирования гидрологических процессов и явлений в бассейнах рек и водохранилищ» (№ госрегистрации AAAA—A20—120112690061—1).

Для цитирования: Георгиевский М. В., Чепикова С. С., Терехов А. В., Казаков Э. Э. Методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды рек Ленинградской области и Камчатского края с использованием автоматизированной информационной системы (АИС) // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 626—644. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-626-644.

Original article

Methodology of short—term water levels (discharges) forecast of rivers in Leningrad and Kamchatka regions using an automated information system (AIS)

*Mikhail V. Georgievsky¹, Svetlana S. Chepikova¹,
Anton V. Terekhov², Eduard E. Kazakov³*

¹ State Hydrological Institute, mgeorgievsky@hotmail.com

² Arctic and Antarctic Research Institute

³ Independent researcher

Summary. The article discusses a methodology for short-term forecasting of water levels and discharges in rivers of Leningrad and Kamchatka regions, developed by the State Hydrological Institute (SHI). The approach utilizes an Automated Information System (AIS) that integrates hydrological models (HBV, SimHYD, GR4J) and employs automated calibration methods to enhance accuracy. The system's forecasts are based on minimal input data, including daily temperature, precipitation, and water levels, ensuring adaptability for diverse river basins. AIS has been successfully implemented for operational use in the Northwest Hydrometeorological Service and is undergoing adaptation for rivers in Kamchatka. Testing has demonstrated high efficiency, with Nash-Sutcliffe model efficiency coefficients ranging from 0,62 to 0,90 for rivers in Leningrad. For Kamchatka, lower efficiency values are attributed to ongoing calibration. The system supports multiple lead times and improves predictions by averaging results from different models and correcting them using real-time data. The study emphasizes AIS's potential for national-scale application and identifies further improvements, such as integrating additional models for specific hydrological conditions and enhancing data processing techniques. The approach is positioned as a cost-effective and versatile tool for hydrological forecasting in Russia. This article presents a methodology for forecasting water levels and discharges using an automated information system for short-term hydrological forecasting (AIS), developed at the State Hydrological Institute (SHI) for rivers in the Leningrad (Tikhvinka, Luga, Tosna, and Tigoda) and Kamchatka (Bolshaya Vorovskaya and Amchigacha) Regions. The AIS forecasting technology has been integrated into the operational practice of the North-West Hydrometeorological Service. AIS is a comprehensive IT solution that requires minimal input data and setup time, offering significant potential for adaptation to other river basins across the Russian Federation.

Keywords: short-term forecasting methodology, automatic information system, hydrological modeling, automatic calibration of hydrological models, rivers of Leningrad and Kamchatka regions.

For citation: Georgievsky M. V., Chepikova S. S., Terekhov A. V., Kazakov E. E. Methodology of short—term water levels (discharges) forecast of rivers in Leningrad and Kamchatka regions using an automated information system (AIS). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):626—644. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-626-644.

Одним из важнейших научных направлений деятельности Росгидромета является разработка систем автоматизированной подготовки данных и выпуска гидрологических прогнозов с целью повышения их надежности и своевременного принятия мер по защите народнохозяйственных объектов и населения от воздействия опасных гидрологических явлений [1]. Прогнозирование всегда являлось приоритетным направлением гидрологической науки с момента начала ее развития. За счет применения современных подходов в области информационных технологий (ИТ) становится возможным существенно автоматизировать методы гидрологического мониторинга и прогнозирования. Отметим, что в Российской

Федерации [2, 3, 4] и за рубежом [5] разработано множество различных автоматизированных информационных гидрологических систем. Они связаны в основном с мониторингом, моделированием и прогнозированием гидрологической обстановки в бассейнах рек. Примером применения такой системы на региональном уровне может служить система руководства по борьбе с быстро развивающимися наводнениями (англ. Flash Flood Guidance System) [6]. Если же рассматривать территорию Российской Федерации, то, несмотря на достаточное количество научных публикаций, посвященных автоматизированным системам гидрологических прогнозов, к полноценно функционирующим системам, выполняющим в настоящий момент в режиме реального времени краткосрочные гидрологические прогнозы, можно отнести только системы, разработанные в ФГБУ «Гидрометцентр России» («ГИС-Амур» [7], «ГИС-Волга» [8] и ГИС «Гидрология» [8]). Разработка альтернативных автоматизированных информационных систем (АИС) краткосрочных гидрологических прогнозов, основанных на компонентах с открытым исходным кодом, является актуальной и важной научно-практической задачей современной российской гидрологии.

В Государственном гидрологическом институте (ГГИ) на протяжении нескольких последних лет разрабатывается методика краткосрочного гидрологического прогнозирования, которая является основой АИС [9, 10, 11]. В настоящий момент АИС передана в опытную эксплуатацию в Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Северо-Западное УГМС) и используется для краткосрочного прогнозирования уровней воды для створов на реках Ленинградской области: Тихвинка, Луга, Тосна и Тигода. В конце 2022 г. на техническом совете Северо-Западного УГМС было принято решение внедрить технологию АИС в оперативную практику УГМС со статусом «консультативный» прогноз с заблаговременностью 1—2 суток для гидрологических постов: р. Тихвинка — г. Тихвин (прогнозы уровней периода половодья), р. Тихвинка — д. Горелуха (прогнозы уровней периодов половодья и дождевых паводков). В данный момент в сотрудничестве со специалистами Камчатского УГМС проходит заключительная фаза адаптации системы для рек Камчатского края (р. Амчигача и р. Большая Воровская).

Цель статьи — представить разработанную в ГГИ методику краткосрочного гидрологического прогнозирования, основанную на результатах моделирования трёх концептуальных гидрологических моделей (HBV, SimHYD и GR4J), и продемонстрировать её эффективность для различных речных бассейнов.

Общие сведения об автоматизированной информационной системе краткосрочных гидрологических прогнозов

На рис. 1 показана общая схема функциональных частей и потоков данных АИС. Система состоит из двух основных функциональных частей: подсистемы получения данных и гидрологического прогнозирования и подсистемы веб-интерфейса (веб-сервис) для конечных пользователей.

АИС функционирует по принципам клиент-серверной архитектуры. Серверное приложение построено на компонентах с открытым исходным кодом.



Рис. 1. Общая схема функциональных частей и потоков данных в АИС.

Fig. 1. Generalized diagram of the automatic information system for short-term hydrological forecasts.

В разработанной системе используются операционная система GNU/Linux Ubuntu, а также её средства по запуску операций по расписанию, компактная однофайловая система управления базами данных SQLite, язык программирования Python с библиотеками Flask, SQLAlchemy, SciPy, GDAL. Интегрированные в систему гидрологические модели HBV, SimHYD, GR4J также реализованы на языке Python. Графический веб-интерфейс АИС построен на базе языка JavaScript с использованием технологий Leaflet, DHTMLX и ApexCharts.

Первоначально были сформулированы два основных требования к разрабатываемой системе:

1. Использование минимального количества исходной гидрометеорологической информации для краткосрочного прогноза уровня воды (суточные температура воздуха, осадки и расходы или уровни воды).
2. Возможность быстрой адаптации системы для любого потенциально исследуемого речного бассейна, для которого имеется минимальный объем исходной информации.

АИС представлена на сервере Государственного гидрологического института и доступна по ссылке URL: <http://91.151.178.102:20006/>.

Исследуемые речные бассейны и исходная гидрометеорологическая информация

В настоящее время система используется для шести рек: четырех — в Ленинградской области и двух — в Камчатском крае, с расположенными на них десятью гидрологическими постами (рис. 2). На рис. 2 представлены бассейны рек в Ленинградской области и Камчатском крае, с расположенными на них гидрологическими постами, отображенные в разделе АИС «Карта» на сайте ФГБУ «ГГИ», а в табл. 1 приведены их основные характеристики.

Исходной гидрометеорологической информацией, необходимой для прогнозирования, являются:

— суточные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам, а также данные по расходам или уровням воды за исторический период, необходимые для моделирования и калибровки расходов (уровней) воды с помощью гидрологических моделей, входящих в модуль гидрологического моделирования и прогнозирования, а также верификации результатов моделирования;

— прогнозные данные по суточным температуре воздуха и осадкам (для АИС возможна различная заблаговременность прогнозных данных, в настоящий момент используются метеорологические данные заблаговременностью 3 суток)

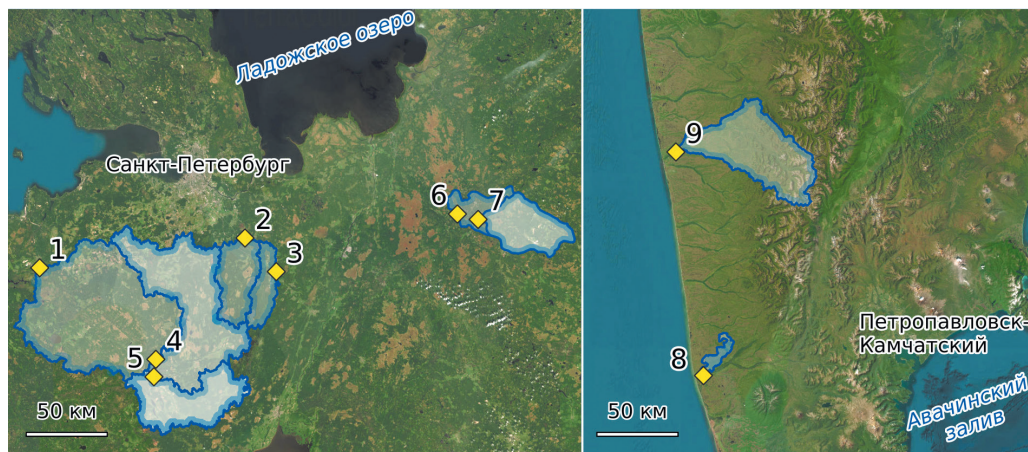


Рис. 2. Бассейны исследуемых рек Ленинградской области (1—7) и Камчатского края (8—9) с расположенными на них гидрологическими постами:

- 1 — р. Луга — г. Кингисепп, 2 — р. Тосна — ст. Тосно, 3 — р. Тигода — г. Любань, 4 — р. Луга — ст. Толмачёво, 5 — р. Луга — г. Луга, 6 — р. Тихвинка — д. Горелуха, 7 — р. Тихвинка — г. Тихвин, 8 — р. Амчигача — с. Усть—Большерецк, 9 — р. Большая Воровская — с. Соболево.

Fig. 2. The basins of the studied rivers of Leningrad (1—7) and Kamchatka (8—9) Regions with the hydrological posts located on them:

- 1 — riv. Luga River — Kingisepp city, 2 — riv. Tosna — Tosno station, 3 — riv. Tigoda — Lyuban city, 4 — riv. Luga — Tolmachevo station, 5 — riv. Luga — Luga city, 6 — riv. Tikhvinka — vil. Gorelukha, 7 — riv. Tikhvinka — Tikhvin city, 8 — riv. Amchigacha — vil. Ust—Bolsheretsk, 9 — riv. Bolshaya Vorovskaya — vil. Sobolevo.

для осуществления гидрологического прогнозирования и фактические данные об уровнях (расходах) воды для коррекции результатов прогнозирования.

Таблица 1

Основные характеристики
исследуемых речных бассейнов и гидрологических постов (ГП)
Main characteristics of the studied river basins and hydrological gauging stations

Река — пост	Площадь бассейна, км ²	Отметка нуля поста	Система высот	Дата открытия	Разряд ГП	Используемые данные наблюдений
р. Тихвинка — г. Тихвин	1600	32,08	БС	11.10.2005	ГП2	с 2008 года
р. Тихвинка — д. Горелуха	2070	28,11	БС	06.08.1876	ГП1	с 2008 года
р. Луга — г. Луга	2330	35,08	БС	30.09.1934	ГП1	с 2008 года
р. Луга — ст. Толмачёво	6165	30,9	БС	14.04.1916	ГП1	с 2008 года
р. Луга — г. Кингисепп	12308	−0,06	БС	28.12.1932	ГП1	с 2008 года
р. Тосна — ст. Тосно	1300	24,69	БС	01.01.1920	ГП1	с 2008 года
р. Тигода — ст. Любань	589	28,9	БС	15.04.1944	ГП1	с 2008 года
р. Амчигача — с. Усть-Большерецк	304	2,00	усл.	26.08.1940	ГП3	с 1980 года
р. Большая Воровская — с. Соболево	3630	7,96	усл.	02.03.1941	ГП1	с 1976 года

Методика краткосрочного прогнозирования уровней/расходов воды

На рис. 3 представлено схематическое описание методики краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды.

На первом этапе осуществляется адаптация модуля моделирования и прогнозирования для исследуемого речного бассейна (створа), который состоит из трех концептуальных гидрологических моделей HBV, SimHYD и GR4J. Для этой цели используются суточные гидрометеорологические данные по трем переменным, желательно за наиболее продолжительный исторический период: температуре воздуха, атмосферным осадкам и расходам или уровням воды. После подготовки необходимых данных по каждой модели осуществляется моделирование речного стока с помощью методов автоматической калибровки основных параметров модели. Результатом является оптимальный набор параметров модели, позволяющий моделировать речной сток наиболее приближенно к фактическому. Верификация осуществляется с помощью коэффициента Нэша-Сатклиффа.

На втором этапе осуществляется моделирование прогнозных значений речного стока с использованием полученного оптимального набора параметров для каждой гидрологической модели. Для этого используются соответствующие прогнозы температуры воздуха и осадков, а также текущие значения уровня или расхода воды с использованием зависимости $Q = f(H)$.

Возможны несколько вариантов получения прогнозных метеоданных: с серверов управлений гидрометслужбы Росгидромета, по электронной почте, с порталов свободно распространяемых метеорологических данных (например, Global



Рис. 3. Схематическое описание методики краткосрочного прогнозирования расходов/уровней воды.

Fig. 3. Schematic description of the methodology for short—term forecasting of water levels/discharges.

Forecast System (GFS) [12] или OpenWeather (OWM) [13]). Прогнозные данные для рек Ленинградской области предоставляются Северо-Западным УГМС (прогнозные метеорологические данные заблаговременностью 84 часа выкладываются на сервер УГМС), а данные для рек Камчатского края получаются с портала свободно распространяемых метеорологических данных Open-Meteo.com.

После получения прогнозной информации каждой моделью осуществляется моделирование расходов (уровней воды). Прогнозные значения, полученные по каждой модели, сначала усредняют, а затем корректируют на наблюдаемое значение уровня воды на день прогнозирования. Усреднение прогнозных значений от нескольких моделей помогает сгладить ошибки, характерные для каждой из них, повышая общую точность прогноза, так как модели могут компенсировать недостатки друг друга. Корректировка усредненного прогноза на основе реального значения за «сегодняшний» день позволяет учитывать актуальные изменения и повышает точность прогноза в краткосрочной перспективе.

Завершающим этапом перед применением методики в составе АИС являются оперативные испытания эффективности прогнозирования. Испытания осуществляются в соответствии с руководящими документами Росгидромета [14, 15].

Оценка эффективности методики рассчитывается отдельно для каждого гидрологического поста, для которого прогнозируется уровень (расход) воды на основе критериев, описанных ниже.

Модуль гидрологического моделирования и прогнозирования

Модуль гидрологического моделирования и прогнозирования является основой АИС. В настоящий момент модуль включает три концептуальные гидрологические модели: HBV, SimHYD и GR4J. Данные модели являются моделями связи количества осадков и температуры воздуха с объемом речного стока и параметризуются набором численных переменных, подбор оптимальных значений которых является единственной задачей калибровки моделей. Краткое описание моделей приводится ниже.

Гидрологическая модель HBV, разработанная в 70-е годы прошлого века в Швеции [16], является частью гидрологической многоцелевой системы Всемирной Метеорологической Организации. Модель включает три основных модуля: формирование и таяние снежного покрова, динамика влаги в почве и испарение, формирование и трансформация стока. Входные данные — атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальная эвапотранспирация. HBV — известная гидрологическая модель, изначально разработанная для применения в снегодоминантных речных бассейнах. Она успешно адаптирована для речных бассейнов, расположенных в разных странах, включая Российскую Федерацию [17].

Модель SimHYD (на англ. SIMplified HYDrograph — упрощенный гидрограф) разработана австралийским Совместным исследовательским центром гидрологии водосбора (на англ. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology) [18]. Является упрощенной версией концептуальной гидрологической модели «осадки—речной сток» HYDROLOG, разработанной в 1972 г. SimHYD моделирует ежедневный сток, используя в качестве входных данных суточные осадки и потенциальную эвапотранспирацию. Принцип работы модели основан на взаимодействии трех резервуаров: потери воды при перехвате осадков растительностью, почвенной влаги и подземных вод. SimHYD — одна из наиболее часто используемых моделей дождевого стока в Австралии, которая была успешно применена более чем для 360 речных бассейнов страны [19, 20].

Модель GR4J была разработана в начале 1980-х годов в государственном исследовательском институте Cemagref во Франции. Первая версия модели имела только один параметр. Дальнейшая ее разработка проводилась путем использования большого количества водосборов для оценки качества моделирования и улучшения самой модели. Подход к моделированию GR4J является, в основном, эмпирическим [21] и состоит из поиска наиболее эффективных ее структур с целью получения надежной и экономичной с точки зрения исходных данных и параметров гидрологической модели. GR4J была применена для большого количества водосборов во Франции, а также в других странах с использованием различных систем тестирования и продемонстрировала хорошие результаты [22, 23].

Так как в модели SIMHYD и GR4J не включен блок расчета снеготаяния, то совместно с ними использовалась модель формирования снежного покрова

Sema-Neige [24, 25]. Данная модель основана на методе температурных коэффициентов стаивания, имеет возможность полураспределенного применения и в качестве исходных данных использует температуру воздуха и осадки.

Модуль гидрологического моделирования и прогнозирования также включает:

- блок пересчета смоделированных расходов в уровни воды и обратно;
- блок увязки уровней воды между гидрологическими постами;
- модель машинного обучения CatBoost (градиентного бустинга) для осуществления прогнозов уровней воды для створов, где не измеряются расходы (работает в тестовом режиме).

Калибровка моделей

Для успешного применения гидрологической модели для конкретного речного водосбора (под успешным подразумевается возможность моделировать речной сток близко к наблюдаемым значениям) необходимо подобрать оптимальные значения основных ее параметров. Для этого используются методы ручной или автоматической калибровки. Так как при разработке АИС ставилась задача быстрой адаптации системы для любого гипотетического исследуемого речного бассейна, то было решено включить в систему методы автоматической калибровки параметров, учитывая, что для концептуальных моделей применение данных методов не требует значительных временных ресурсов по сравнению с распределенными сеточными моделями.

Изначально для подбора оптимальных параметров моделей применялся автоматизированный подход, основанный на методе случайного подбора оптимальных параметров, схожий с подходом, предложенным в [26], суть которого заключается в следующем: сначала выполняется 100000 итераций случайного выбора параметров с оценкой каждой комбинации по критерию Нэша-Сатклиффа на основе архивной метеорологической и гидрологической информации за наиболее продолжительный доступный период. Затем отбирается лучшая комбинация параметров, и для неё выполняется новый итеративный отбор — каждый параметр немного увеличивается или уменьшается, и оценивается градиент критерия Нэша-Сатклиффа. После того, как для параметра достигается наилучшее локальное значение критерия, осуществляется переход к следующему параметру.

Позже в АИС был добавлен второй способ оптимизации параметров, который основан на алгоритме глобальной автоматизации и разработан специально для калибровки концептуальных гидрологических моделей в Университете Аризоны (на англ. Shuffled Complex Evolution Model — SCE-UA). SCE-UA ищет глобальный оптимум функции, эволюционируя кластеры образцов, взятых из пространства параметров с помощью систематического конкурентного эволюционного процесса. Алгоритм продемонстрировал свою эффективность при калибровке гидрологических моделей [27] и широко применяется в различных научных и инженерных областях. Процесс калибровки в АИС заключается в создании конфигурационных файлов с заданными граничными значениями параметров моделей, выбора целевой функции (в нашем случае было выбрано значение квадратного корня среднеквадратической ошибки) и запуска калибровки с выбранным количеством итераций (100 тысяч).

Верификация результатов моделирования и оценки качества гидрологических прогнозов

В настоящее время одним из наиболее часто употребляемых в большинстве стран мира критериев как для оценки качества результатов работы гидрологических моделей, так и для калибровки и верификации моделей, является критерий Нэша-Сатклифа, разработанный в 1970 г. [28]. На основе данного критерия осуществлялся выбор оптимальных параметров моделей.

В практике Росгидромета вывод о применимости методики прогнозирования делается по результатам сравнения с погрешностью альтернативного прогноза [29]. Основным критерием качества и применимости прогноза является отношение S/σ_{Δ} , где S — средняя квадратическая погрешность проверяемых прогнозов, σ_{Δ} — погрешность альтернативного прогноза. Поскольку разработанная АИС предназначена для краткосрочных прогнозов уровней воды, в качестве альтернативной методики выбран инерционный прогноз. Для оценки его погрешности использована следующая формула:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \underline{\Delta})^2}, \quad (1)$$

где σ_{Δ} — погрешность альтернативного прогноза, n — количество измерений.

Величина $\underline{\Delta}$ вычисляется как среднее арифметическое ряда $\Delta_1 \dots \Delta_n$, образованного n наблюдавшимися изменениями уровня за период заблаговременности прогноза. Число прогнозов для каждой временной заблаговременности прогноза (1, 2 и 3 суток вперед) должно быть не менее 60 для периода половодья и не менее 30 для дождевых паводков (для каждого поста). Отношение S/σ_{Δ} рассчитывается отдельно для периодов половодья, паводков и межени. Эффективной считается методика, для которой отношение S/σ_{Δ} меньше или равно 0,8.

По значениям показателя S/σ_{Δ} определяется обеспеченность методики в процентах (P): каждый прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка не превышает допустимую погрешность, равную $\pm 0,674\sigma_{\Delta}$. Обеспеченность методики рассчитывается исходя из отношения оправдавшихся прогнозов к общему их количеству. Оценка эффективности проводится отдельно для ансамблевого прогноза, скорректированного с учетом фактического уровня воды, и для нескорректированного, а также отдельно для всех категорий заблаговременности: одни, двое и трое суток.

Результаты применения гидрологических моделей для исследуемых бассейнов

В табл. 2 представлена оценка качества результатов расчетов по гидрологическим моделям, входящим в состав модуля гидрологического прогнозирования и моделирования АИС, для исследуемых рек, выполненная методом автоматической калибровки SCE-UA за исторический период. Представленные значения получены за 2008—2020 гг. для рек Ленинградской области и 1986—1994 гг. для рек Камчатского края. На основе полученных параметров моделей автоматизированной информационной системой в настоящее время осуществляется расчет прогнозных значений речного стока в исследуемых створах.

Таблица 2

Оценка качества результатов моделирования гидрологических моделей, входящих в состав АИС, для исследуемых рек, полученных методом автоматической калибровки SCE-UA за исторический период

Quality assessment of the modeling results of the hydrological models included in the AIS for the studied rivers, obtained by the SCE-UA automatic calibration method for the historical period

Река — створ	HBV		SimHYD		GR4	
	СКО	Критерий Нэ-ша-Сатклиффа	СКО	Критерий Нэ-ша-Сатклиффа	СКО	Критерий Нэ-ша-Сатклиффа
р. Луга — г. Кингисепп	675	0,73	76,5	0,65	79,1	0,63
р. Луга — г. Луга	51,9	0,73	60,8	0,63	60,1	0,63
р. Луга — ст. Толмачёво	65,1	0,78	64,9	0,78	76,3	0,70
р. Тигода — г. Любань	41,5	0,83	45,0	0,80	47,6	0,77
р. Тосна — ст. Тосно	29,9	0,90	38,1	0,84	61,2	0,58
р. Амчигача — с. Усть-Большерецк	17,5	0,45	20,9	0,22	19,8	0,30
р. Большая Воровская — с. Соболево	11,9	0,64	10,5	0,71	10,3	0,73

В качестве примера на рис. 4 и 5 показаны рассчитанные гидрологическими моделями системы на основе полученных параметров значения уровней воды по сравнению с наблюдаемыми значениями для рассматриваемых рек (за период

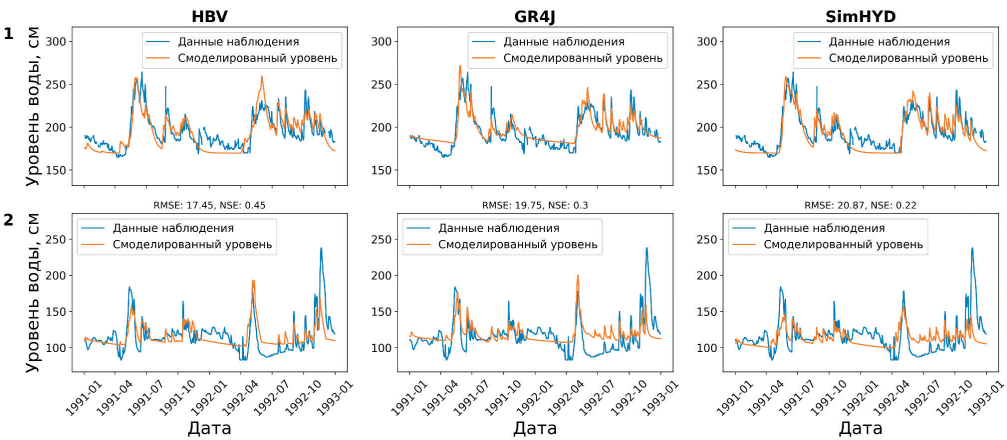


Рис. 4. Смоделированные и наблюдаемые уровни воды для двух гидрологических створов Камчатского Края (за период с 1991 г. по 1993 г.): 1 — р. Большая Воровская — с. Соболево, 2 — р. Амчигача — с. Усть-Большерецк.

Fig. 4. Modeled and observed water levels for two hydrological sections of Kamchatka Krai (for the period from 1991 to 1993):

1 — riv. Bolshaya Vorovskaya — vil. Sobolevo, 2 — riv. Amchigacha — vil. Ust-Bolsheretsk.



Рис. 5. Смоделированные и наблюдаемые уровни воды для основных гидрологических створов на реках Ленинградской области (за период с 2010 г. по 2012 г.):

1 — р. Тосна — ст. Тосно, 2 — р. Луга — г. Луга, 3 — р. Луга — ст. Толмачёво,
4 — р. Луга — г. Кингисепп, 5 — р. Тигода — г. Любань.

Fig. 5. Modeled and observed water levels for the main hydrological cross—sections on the rivers of the Leningrad Region (for the period from 2010 to 2012):

1 — riv. Tosna — Tosno station, 2 — riv. Luga — Luga city, 3 — riv. Luga — Tolmachevo station,
4 — riv. Luga River — Kingisepp city, 5 — riv. Tigoda — Lyuban city.

с января 2010 г. по январь 2012 г. для рек Ленинградской области и за период с января 1991 г. по январь 1993 г. для рек Камчатского края).

Как уже отмечалось, заключительным этапом перед запуском АИС является испытание оценки эффективности методики краткосрочного прогнозирования. На рис. 6 показаны периоды половодья и паводков, для которых осуществлялась оценка, а в табл. 3 в качестве примера успешных испытаний методики приводятся результаты оценки эффективности краткосрочного прогнозирования уровней воды на гидрологическом посту р. Тихвинка — д. Горелуха в 2020 г. — 2022 г.

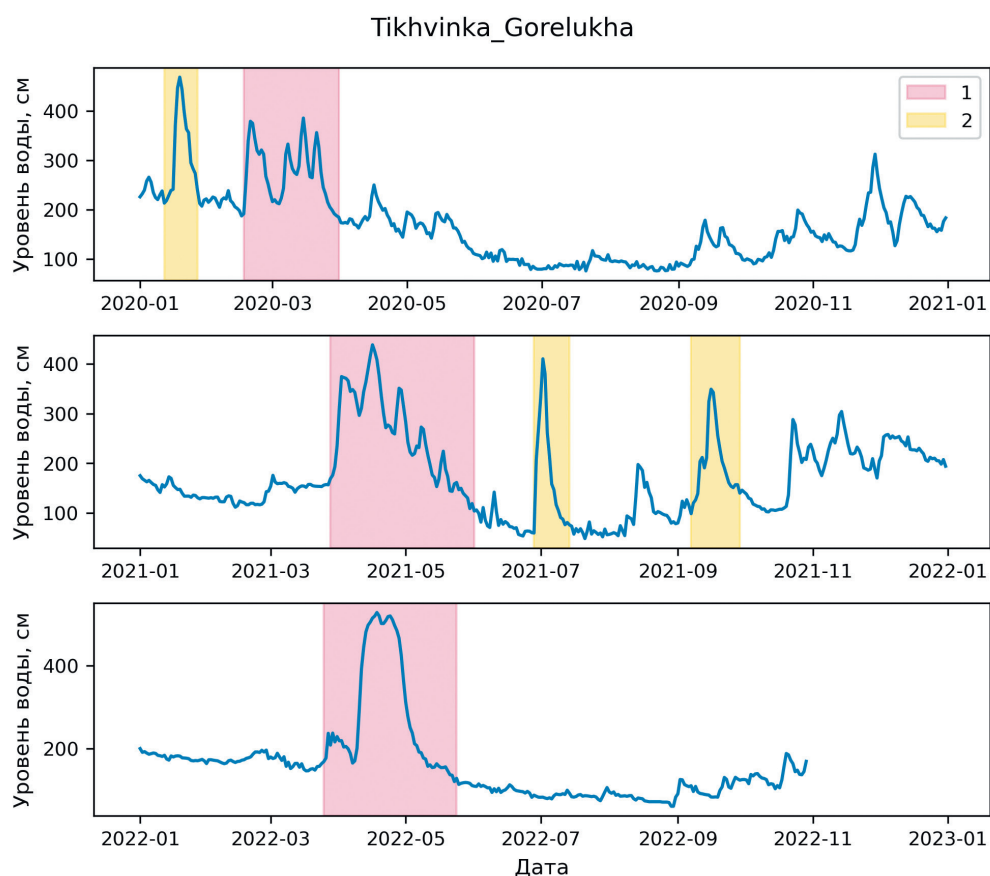


Рис. 6. Измеренные уровни воды на гидрологическом посту р. Тихвинка — д. Горелуха в 2020 г. — 2022 г.:

1 — половодье, 2 — дождевые паводки.

Fig. 4. Measured water levels at the hydrological post of riv. Tikhvinka — vil. Gorelukha in 2020—2022:

1 — spring flood, 2 — rain floods.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности методики краткосрочного прогнозирования уровней воды на гидрологическом посту р. Тихвинка — д. Горелуха в 2020 г. — 2022 г. (заблаговременность 2 суток)

Assessment results of the effectiveness of the methodology for short—term forecasting of water levels at the hydrological post of riv. Tikhvinka — vil. Gorelukha in 2020—2022 (lead time: 2 days)

Год	Период	Даты	S , см	σ_{Δ} , см	S/σ_{Δ}	P , %	n , сут.
2021	Половодье	28.03.21—01.06.21	27 (62)*	48	0,57 (1,42)	59 (17)	54
	Дождевые паводки	28.06.21—14.07.21, 07.09.21—29.09.21	45 (99)	79	0,57 (1,25)	73 (12)	33
	Год целиком	01.01.21—31.12.21	28 (76)	42	0,65 (1,79)	57 (12)	240
2022	Половодье	25.03.22—24.05.22	25 (125)	53	0,47 (2,35)	45 (12)	51
	Дождевые паводки	—	—	—	—	—	—
	Первые 3 кв. года	01.01.22—30.09.22	16 (82)	27	0,58 (3,06)	62 (18)	218

Примечание: знак * здесь и далее в таблице в скобках указан результат без коррекции на текущий уровень.

Обсуждение

По мнению авторов, существует несколько возможных направлений для продолжения разработки и улучшения системы прогнозирования. Прежде всего, это касается основного модуля гидрологического моделирования и прогнозирования. В настоящий момент модуль основан на использовании трех концептуальных гидрологических моделей. Нельзя не отметить, что модели продемонстрировали хорошие результаты для исследуемых рек. Тем не менее, данный список моделей не является окончательным, поскольку хорошо известно, что гидрологические модели по-разному моделируют сток для речных бассейнов с различным генезисом формирования стока. Для дальнейшего усовершенствования модуля гидрологического моделирования нужна интеграция в него гидрологических моделей, разработанных для различных специфических условий формирования стока (например, для горных рек или засушливых регионов) с целью более гибкой настройки системы для конкретных рек.

Методы автоматической калибровки параметров позволяют избежать субъективности и временных затрат при ручной калибровке моделей. Используемый в настоящий момент метод автоматизации Университета Аризоны хорошо себя зарекомендовал при калибровке различных гидрологических моделей, но, по мнению авторов, в данном направлении необходимо проведение дальнейших научных исследований.

Результаты прогнозирования уровней воды, особенно в случаях дождевых паводков, зависят от исходной прогнозной метеорологической информации, в первую очередь, от прогнозных данных по осадкам. Как бы хорошо не была настроена система прогнозирования, если прогнозные данные некорректны, то результаты прогнозирования могут быть неудовлетворительными.

Основные выводы

В статье представлена методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды, являющаяся основным блоком автоматизированной информационной системы краткосрочных гидрологических прогнозов, разработанной в ГГИ. В настоящий момент АИС адаптирована и функционирует в онлайн-режиме для четырех рек Ленинградской области и двух рек Камчатского края. Применение системы для данных рек продемонстрировало ее эффективность: показатели критерия Нэша-Сатклиффа составляют 0,62—0,90 для гидрологических постов Ленинградской области. Для рек Камчатского края показатели критерия хуже (0,30—0,73), но для данных постов все еще проходит адаптация системы с целью повышения качества прогнозирования.

В результате проведения испытаний по оценке эффективности методики краткосрочного прогнозирования в Северо-Западном УГМС были установлено, что показатели $S/\sigma\Delta$ и оправдываемости выше при оценке в периоды половодья и паводков, чем для всего года. Также было выявлено, что для заблаговременности в двое суток показатели эффективности моделирования выше для всех моделей, чем для заблаговременности в одни сутки.

Представленная система является готовым решением в области информационных технологий, которое при минимальном наборе исходной гидрометеорологической информации может быть адаптировано для других речных бассейнов Российской Федерации.

Список литературы

1. Бельчиков В. А., Борщ С. В., Павроз Ю. А. и др. Современное состояние и перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 184—202.
2. Вуглинский В. С., Гусев С. И. Вторая очередь автоматизированной информационной системы государственного водного кадастра // Метеорология и гидрология. 1989. № 7. С. 105—107.
3. Зеленцов В. А., Потрысаев С. А., Пиманов И. Ю. и др. Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 55. С. 74—85. DOI:10.33933/2074—2762—2019—55—74—85.
4. Кузьмин В. А., Полякова А. А., Еремина С. В. и др. Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2013. № 29. С. 29—35.
5. Sánchez-Quispe S. T., Madrigal J., Rodríguez-Licea, D. et al. Development of a Low-Cost Automated Hydrological Information System for Remote Areas in Morelia, Mexico // Water. 2023. 15. 3888. doi: 10.3390/w15223888.
6. Georgakakos K. P., Modrick T. M., Shamir E. et al. The flash flood guidance system implementation worldwide: A successful multidecadal research-to-operations effort // Bulletin of the American Meteorological Society. 2022. 103 (3). E665—E679.
7. Фролов А. В., Асмус В. В., Борщ С. В. и др. «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. №3. С. 5—21.
8. Дерюгина В. В., Борщ С. В., Кровотынцев В. А. и др. ВЕБ ГИС системы мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек России с использованием наземных и спутниковых данных // Материалы 17—й Всероссийской открытой конференции

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. 2019. С. 84.
9. Казаков Э. Э., Шеманаев К. В., Журавлев С. А. и др. Автоматизированная система краткосрочного гидрологического прогнозирования, основанная на концептуальных моделях с открытым исходным кодом (на примере р. Тихвинки) // Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. 2020. С. 268—273.
 10. Kazakov E. E., Shemanaev K. V., Zhuravlev S. A. et al. Automated short-term forecast system based on open-source hydrological models for the Tikhvinka river (Leningrad region of Russia) // E3S Web of Conferences. 2020. V. 163. 02002. doi: 10.1051/e3sconf/202016302002.
 11. Сарафанов М. И., Казаков Э. Э., Борисова Ю. И. Применение методов машинного обучения для связей уровней воды на створах вверх и вниз по течению реки // Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. 2020. С. 151—156.
 12. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP climate forecast system version 2 // J. Climate, 2014. V. 27. P. 2185—2208. doi: 10.1175/JCLI—D— 12—00823.1.
 13. Yanes A. Openweather: a peer-to-peer weather data transmission protocol. Aalto University. Masters's thesis. 2011. 138 p.
 14. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч.I. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
 15. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
 16. Lindström G., Johansson B., Persson M. et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // Journal of hydrology. 1997. 201 (1). P. 272—288.
 17. Лупакова С. Ю., Бугаец А. Н., Шапов В. В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Водные ресурсы. 2021. Том 48. №4. С. 417—426. doi: 10.31857/S032105962104012X.
 18. Chiew F. H. S., Peel M. C., Western A. W. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD / Mathematical models of small watershed hydrology and applications. 2002. P. 335—367.
 19. Peel M. C., Chiew F. H. S., Western A. W. et al. Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments / Canberra, National Land and Water Resources Audit. 2000.
 20. Chiew F. H. S., Vaze J., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across the Murray-Darling Basin / A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project. CSIRO, Australia. 2008. 62p.
 21. Michel C., Perrin C., Andréassian V. et al. Has basin-scale modelling advanced beyond empiricism? In: Andréassian V., Hall A., Chahinian N., Schaake, J. (eds). Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: results of the model parameter experiment (MOPEX). 2006. IAHS Publication 307. P. 108—116.
 22. Andréassian V., Perrin C., Berthet L. et al. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models // Hydrol. Earth. Syst. Sci. 2009. 13. P. 1757—1764.
 23. Vaze J., Perraud J.—M., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Data-sets, models and results // Australian Journal of Water Resources. 2010. 14(2). P. 101—116.
 24. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. As simple as possible but not simpler: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 — Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments // J. Hydrol. 2014. 517. P. 1166—1175. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.059, 2014a.
 25. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. As simple as possible but not simpler: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 — Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments // J. Hydrol. 2014. 517. P. 1176—1187. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058, 2014b.

26. Lindstrom G. A simple automatic calibration routine for the HBV model // *Hydrology Research*. 1997. 28(3). P. 153—168.
27. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models // *Journal of hydrology*. 1994. Vol. 158(3—4). P. 265—284.
28. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 — A discussion of principles // *Journal of hydrology*. 1970. V. 10. P. 282—290.
29. Борщ С. В., Христофоров А. В. Оценка качества прогнозов речного стока // *Труды Гидрометцентра России. Специальный выпуск*. 2015. 355. С. 3—195.

References

1. Belchikov V. A., Borshch S. V., Pavroz Yu. A. et al. Current status and prospects for improving the operational hydrological forecasting system in the Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2019; 4(374):(184—202). doi: 10.37162/2618—9631—2019—4—184—202. (In Russ.).
2. Vulginskij V. S., Gusev S. I. The second stage of the automated information system of the state water cadastre. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 1989; (7):(105—107). (In Russ.).
3. Zelentsov V. A., Potryashev S. A., Pimanov I. Yu. et al. Automation of monitoring and complex modeling of the hydrological situation in river basins. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019;(55):(74—85). doi:10.33933/2074—2762—2019—55—74—85. (In Russ.).
4. Kuzmin V. A., Polyakova A. A., Eremina S. V. et al. Automated forecasting of hazardous hydrological phenomena in poorly studied and unstudied watersheds of the Russian Federation. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013; (29): (29—35). (In Russ.).
5. Sánchez—Quispe, S. T., Madrigal J., Rodríguez—Licea D. et al. Development of a Low—Cost Automated Hydrological Information System for Remote Areas in Morelia, Mexico. *Water*. 2023; (15): (3888). doi:10.3390/w15223888.
6. Georgakakos K. P., Modrick T. M., Shamir E. et al. The flash flood guidance system implementation worldwide: A successful multidecadal research-to-operations effort. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2022; 103 (3): (E665—E679).
7. Frolov A. V., Asmus V. V., Borshch S. V. et al. “GIS Amur”: system for monitoring, forecasting and early warning of floods. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2016; (3): (5—21). (In Russ.).
8. Deryugina V. V., Borshch S. V., Krovotyntsev V. A. et al. WEB GIS system for monitoring and forecasting the hydrological situation in the basins of large rivers in Russia using ground and satellite data. *Materialy 17—j Vserossijskoj otkrytoj konferencii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa» = Proceedings of the 17th All—Russian open conference “Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”* Moscow: IKI RAN. 2019; (84).
9. Kazakov E. E., Shemanaev K. V., Zhuravlev S. A. et al. Automated short-term hydrological forecasting system based on open source conceptual models (using the example of the Tikhvinka River). *Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovozzreniyu: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova = IV Vinogradov Conference “Hydrology: from learning to worldview”* In memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov. 2020; 268—273. (In Russ.).
10. Kazakov E. E., Shemanaev K. V., Zhuravlev S. A. et al. Automated short-term forecast system based on open-source hydrological models for the Tikhvinka river (Leningrad region of Russia). *E3S Web of Conferences*. 2020; (163): 02002. doi: 10.1051/e3sconf/202016302002.
11. Sarafanov M. I., Kazakov E. E., Borisova Yu. I. Application of machine learning methods for linking water levels at the upstream and downstream river channels. *Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovozzreniyu: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova = IV Vinogradov Conference “Hydrology: from learning to worldview”* In memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov.. 2020:(151—156). (In Russ.).

12. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of climate*. 2014; (27): (2185—2208). doi: 10.1175/JCLI—D—12—00823.1.
13. Yanes A. Openweather: a peer-to-peer weather data transmission protocol. Aalto University. Masters's thesis. 2011; 138 p.
14. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Ch.I. Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. Prognozy rezhima vod sushi = Manual for the forecast service. Section 3. Part I. Hydrological forecast service. Forecasts of the land water regime*. L.: Gidrometeoizdat, 1962; 193 p. (In Russ.).
15. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov = Guideline document 52.27.284—91. Methodological instructions. Conducting production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts. L.: Gidrometeoizdat, 1991; 150 p. (In Russ.).
16. Lindström G., Johansson B., Persson M. et al. Development and test of the distributed HBV—96 hydrological model. *Journal of hydrology*. 1997; 201(1—4): 272—288.
17. Lupakova S. Yu., Bugaets A. N., Shamov V. V. Application of various structures of the HBV model to study the processes of runoff formation on the example of experimental catchments. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; 48 (4): (417—426). doi: 10.31857/S032105962104012X. (In Russ.).
18. Chiew F. H. S., Peel M. C., Western A. W. Application and testing of the simple rainfall—runoff model SIMHYD. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*. 2002; (335—367).
19. Peel M. C., Chiew F. H. S., Western A. W. et al. Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments. Canberra, National Land and Water Resources Audit. 2000.
20. Chiew F. H. S., Vaze J., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across the Murray-Darling Basin. A Report to the Australian Government From the CSIRO Murray—Darling Basin Sustainable Yields Project. Canberra: Australia. 2008; 62 p.
21. Michel C., Perrin C., Andréassian V. et al. Has basin-scale modelling advanced beyond empiricism? *IAHS Publication*. 2006; (307): 108—116.
22. Andréassian V., Perrin C., Berthet L. et al. HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models”. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009; (13): 1757—1764.
23. Vaze J., Perraud J.—M., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Data-sets, models and results. *Australian Journal of Water Resources*. 2010; 14 (2): 101—116.
24. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. “As simple as possible but not simpler”: What is useful in a temperature—based snow—accounting routine? Part 1 — Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *Journal of hydrology*. 2014; (517): (1166—1175). doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.059.
25. Valéry A., Andréassian V., and Perrin C. “As simple as possible but not simpler”: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 — Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of hydrology*. 2014; (517): (1176—1187). doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.
26. Lindstrom G. A simple automatic calibration routine for the HBV model. *Hydrology Research*. 1997; 28 (3): 153—168.
27. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K. Optimal use of the SCE—UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*. 1994; 158 (3—4): 265—284.
28. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 — A discussion of principles // *Journal of hydrology*. 1970. V. 10. P. 282—290.
29. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Assessment of the quality of river runoff forecasts. *Trudi Gidromettsentra Rossii. Spetsialnii vipusk = Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia. Special issue*. 2015; (355): (3—195). (In Russ.).

Сведения об авторах

Георгиевский Михаил Владимирович, к.г.н., ведущий научный сотрудник, зам. заведующего лабораторией гидрофизики, руководитель группы геоинформационных технологий Государственного гидрологического института, mgeorgievsky@hotmail.com.

Чепикова Светлана Сергеевна, младший научный сотрудник группы геоинформационных технологий Государственного гидрологического института, chepikova.s@hydrology.ru.

Терехов Антон Викторович, научный сотрудник отдела географии полярных стран, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, terexterex@gmail.com.

Казаков Эдуард Эдуардович, независимый исследователь, ee.kazakov@gmail.com.

Information about authors

Mikhail V. Georgievsky, Ph. D., Leading Researcher, Deputy Head of the Laboratory of Hydrophysics, Head of the Geoinformation Technologies Group, State Hydrological Institute.

Svetlana S. Chepikova, Junior Researcher, Geoinformation Technologies Group, State Hydrological Institute.

Anton V. Terekhov, Researcher, Department of Geography of Polar Countries, Arctic and Antarctic Research Institute.

Eduard E. Kazakov, Independent researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.08.2024

Принята после доработки в печать 24.11.2024

The article was received on 26.08.2024

The article was accepted after revision on 24.11.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 645—660.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):645—660.

Научная статья

УДК 556.048

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-645-660

Оценка стандартных ошибок выборочных коэффициентов вариации и асимметрии при анализе гидрологических рядов

Александр Владимирович Сикан¹, Денис Александрович Щеглов²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, sikan07@yandex.ru

² Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В настоящей работе на основе искусственных гидрологических рядов, полученных методом Монте-Карло, проведено исследование стандартных ошибок выборочных коэффициентов вариации и асимметрии. В качестве базового распределения использовалось распределение Пирсона III типа. Исследовались выборки продолжительностью от 10 до 200 лет с различными значениями коэффициентов вариации и асимметрии. Выполнен анализ существующих формул стандартных ошибок выборочных параметров распределения. Предложен новый алгоритм для оценки стандартных ошибок коэффициентов вариации и асимметрии. Проверка методики выполнена на примере рядов максимальных расходов рек Северо-Запада РФ.

Ключевые слова: статистический анализ гидрологических рядов, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, стандартные ошибки, распределение Пирсона III типа, метод Монте-Карло.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы кафедры инженерной гидрологии РГГМУ «Совершенствование методов расчета основных режимных характеристик рек и водоемов с учетом изменений климата и возрастающей антропогенной нагрузки на водосборы водных объектов».

Для цитирования: Сикан А. В., Щеглов Д. А. оценка стандартных ошибок выборочных коэффициентов вариации и асимметрии при анализе гидрологических рядов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 645—660. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-645-660.

Original article

Estimation of standard errors of sample coefficients of variation and asymmetry in the analysis of hydrological series

Alexander V. Sikan¹, Denis A. Shcheglov²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² State Hydrological Institute

Summary. In accordance with the regulatory documents in force in Russia, the methodology for calculating hydrological characteristics depends on the duration of the hydrological series. In the presence of

hydrometric observations of sufficient duration, the calculation is carried out by applying analytical probability distribution functions. In the case of short samples, at the first stage, the series is lengthened using data on analog rivers. The duration of the series is considered sufficient if the relative errors of the average value and the coefficient of variation do not exceed the critical value. For annual and seasonal runoff, the critical value is 10%, for extreme runoff — 20 %.

However, SP 529.1325800.2023 “Determination of the main calculated hydrological characteristics” provides a universal formula only for calculating the standard error of the average value. For the standard error of the coefficient of variation, a formula is given for the case when the ratio of the coefficient of asymmetry to the coefficient of variation is two, i.e. for $C_s/C_v = 2$. The formula for calculating C_s is not provided in the document.

In this paper, based on artificial hydrological series obtained by the Monte Carlo method, a study of standard errors of sample coefficients of variation and asymmetry is carried out. The Pearson type III distribution was used as the base distribution. Samples lasting from 10 to 200 years with different values of coefficient of variation and asymmetry were studied. The analysis of the existing formulas of standard errors of sample distribution parameters is performed. A new algorithm is proposed for estimating the standard errors of the coefficient of variation and asymmetry. The verification of the developed methodology was carried out using the example of the series of maximum expenditures of the spring flood of rivers in the Northwestern region of Russia.

Keywords: statistical analysis of hydrological series, coefficient of variation, coefficient of asymmetry, standard errors, Pearson distribution type III, Monte Carlo method

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the research topic of the Department of Engineering Hydrology of the Russian State Hydrometeorological University “Improving the methods for calculating the main regime characteristics of rivers and reservoirs taking into account climate change and increasing anthropogenic load on the catchment areas of water bodies”.

For citation: Sikan A. V., Shcheglov D. A. Estimation of standard errors of sample coefficients of variation and asymmetry in the analysis of hydrological series. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):645—660. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-645-660.

Введение

В соответствии с действующими нормативными документами методика расчета гидрологических характеристик зависит от продолжительности гидрологического ряда. При наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности расчет «осуществляют путем применения аналитических функций распределения ежегодных вероятностей превышения — кривых обеспеченностей» [1, 2]. При ограниченности данных наблюдений на первом этапе выполняется приведение рядов к многолетнему периоду с использованием данных по рекам-аналогам.

Продолжительность ряда считается достаточной, если относительные ошибки среднего значения и коэффициента вариации не превышают критическое значение. Для годового и сезонного стока критическое значение 10 %, для экстремального стока — 20 %. Однако в Своде Правил СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» представлена универсальная формула только для расчета стандартной ошибки среднего значения. Для стандартной ошибки коэффициента вариации приводится формула для случая, когда отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации равно двум, т. е. для $C_s/C_v = 2$. Формула для расчета стандартной ошибки C_s в СП вообще отсутствует. При этом в методических рекомендациях [2] говорится, что

ошибки C_v и C_s следует определять по специальным таблицам, полученным методом статистических испытаний и опубликованным в монографии А. В. Рождественского [3]. Однако в этих таблицах даны ошибки только для значений C_s/C_v от 1 до 4 и с точностью до одной значащей цифры.

Целью настоящей статьи является задача разработки алгоритма для оценки погрешностей выборочных параметров распределения и оценки надежности применяемых в настоящее время формул.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи моделировались искусственные гидрологические ряды продолжительностью (n) от 10 до 200 лет при различных значениях C_v и C_s/C_v . Для каждого сочетания n , C_v и C_s/C_v моделировалось от 30 до 100 серий по 100 рядов. Рассматривался диапазон значений C_v от 0,1 до 2 и диапазон C_s/C_v от 0 до 6. Моделирование рядов осуществлялось методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) [4—9]. В качестве базового распределения использовалось распределение Пирсона III типа [3, 10, 11 и др.]. При этом предполагалось, что все выборки представляют собой случайные независимые последовательности. Расчет параметров распределения выполнялся методом моментов.

Выбор распределения Пирсона III типа связан с тем, что оно широко используется в мировой практике гидрологических расчетов и в большинстве случаев хорошо аппроксимирует эмпирические распределения. Частными случаями распределения Пирсона III типа являются нормальное распределение (при $C_s \rightarrow 0$), двухпараметрическое гамма-распределение (при $C_s/C_v = 2$) и экспоненциальное распределение (при $C_s = 2$).

Исследование стандартных ошибок среднего значения

В соответствии с методическими рекомендациями [2] относительная среднеквадратическая ошибка выборочного среднего значения при отсутствии автокорреляции при любых соотношениях C_s/C_v рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\bar{x}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100\%. \quad (1)$$

Как показал анализ, для выборок любой продолжительности модельные значения погрешностей совпадают со значениями погрешностей, рассчитанными по формуле (1) при любых сочетаниях C_v и C_s (рис. 1).

Данный вывод не является оригинальным, так как формула (1) является следствием центральной предельной теоремы [12]. Но здесь важно подчеркнуть, что формула (1) дает удовлетворительный результат даже для коротких выборок.

Исследование стандартных ошибок коэффициента вариации

1. *Стандартные ошибки коэффициента вариации для выборок из нормального распределения ($C_s = 0$)*

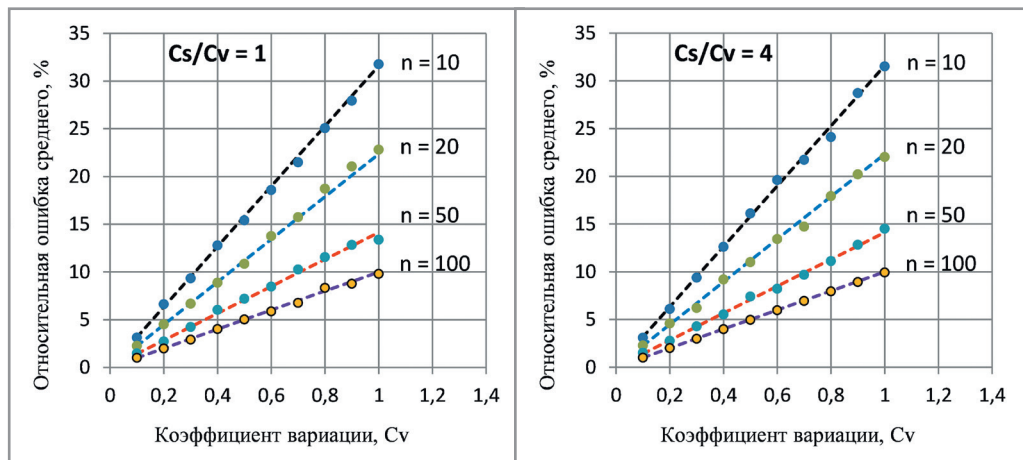


Рис. 1. Зависимости относительной ошибки среднего значения от коэффициента вариации и длины ряда при различных значениях C_s/C_v .

Пунктирные линии — расчет по формуле; точки — модельные данные.

Fig. 1. Dependences of the relative error of the average value on the coefficient of variation and the length of the series at different values of C_s/C_v .

Dotted lines — calculation by formula, dots — model data.

Формулу для расчета стандартной ошибки коэффициента вариации при независимости членов ряда можно представить в виде выражения:

$$\sigma_{c_v} = \frac{C_v \sqrt{1 + a C_v^2}}{\sqrt{2n}}, \quad (2)$$

где a — параметр, зависящий от длины выборки и коэффициента асимметрии.

Считается, что для нормального распределения параметр $a = 2$ [12, 13]:

$$\sigma_{c_v} = \frac{C_v \sqrt{1 + 2 C_v^2}}{\sqrt{2n}}. \quad (3)$$

Однако, как показал численный эксперимент, $a = 2$ соответствует только длинне выборок $n > 200$. Для коротких выборок коэффициент a меняется от 2,95 при $n = 20$ до 2,24 при $n = 100$ (рис. 2).

На основе численного моделирования была получена формула зависимости параметра « a » от длины выборки для нормального распределения:

$$a = 2 + 1,33 e^{-0,017n}. \quad (4)$$

Следует отметить, что формулы типа (2) являются приближенными и могут использоваться для однородных выборок. Попытка получить точное распределение выборочного коэффициента вариации для нормального закона распределения

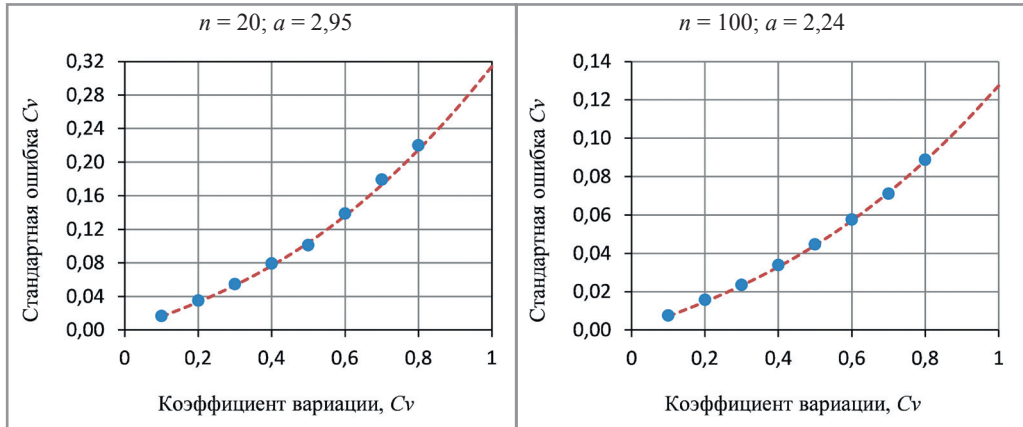


Рис. 2. Зависимости стандартной ошибки выборочного коэффициента вариации от коэффициента вариации при различной длине выборок для нормального распределения по результатам моделирования.

Пунктирные линии — расчет по формуле (3); точки — модельные данные.

Fig. 2. The dependence of the standard error of the sample coefficient of variation on the coefficient of variation for different sample lengths for a normal distribution based on the simulation results.

Dotted lines — calculation according to the formula (3); dots — model data.

предпринята в работе [14]. Вопрос оценки погрешностей параметров распределения по неоднородным выборкам рассматривается в работе [15].

2. Стандартные ошибки коэффициента вариации для выборок из двухпараметрического гамма-распределения ($C_s/C_v = 2$)

При $C_s/C_v = 2$ распределение Пирсона III типа превращается в двухпараметрическое гамма-распределение. В монографиях [16, 17] для этого распределения стандартную ошибку коэффициента вариации рекомендуется определять по формуле (2) при $a = 1$:

$$\sigma_{c_v} = \frac{C_v \sqrt{1 + C_v^2}}{\sqrt{2n}}. \quad (5)$$

Формула (5) рекомендовалась нормативным документом СН 435-72 для расчета стандартной ошибки коэффициента вариации, полученного методом моментов независимо от соотношения C_s/C_v .

В действующем в настоящее время нормативном документе СП 529.1325800.2023 в случае $C_s/C_v = 2$ и при независимости членов выборки рекомендуется формула Е. Г. Блохинова [18]:

$$\sigma_{c_v} = \frac{C_v}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2}}. \quad (6)$$

Как показали результаты моделирования, для получения достоверных оценок стандартных погрешностей коэффициента вариации вместо формул (5) и (6) можно использовать формулу (2) с переменным значением параметра a , так как параметр a при $n < 200$ зависит от длины выборки.

На основе результатов моделирования была получена формула зависимости параметра a от длины выборки для двухпараметрического гамма-распределения:

$$a = 0,8 - 0,75e^{-0,022n}. \quad (7)$$

Установлено, что при длине выборок $n > 200$ параметр a превращается в константу ($a = 0,8$). Переход от стандартной ошибки C_v к относительной ошибке во всех случаях производился по формуле:

$$\varepsilon_{C_v} = \frac{\sigma_{C_v}}{C_v} 100\%. \quad (8)$$

На рис. 4 показаны зависимости относительной ошибки коэффициента вариации от коэффициента вариации при различной длине ряда, полученные по результатам моделирования и рассчитанные с использованием формул (5), (6) и (2).

Как видно на рисунке, модельные данные и расчет по формуле (2) с параметром a , определенным по формуле (7), практически совпадают. Статистическое

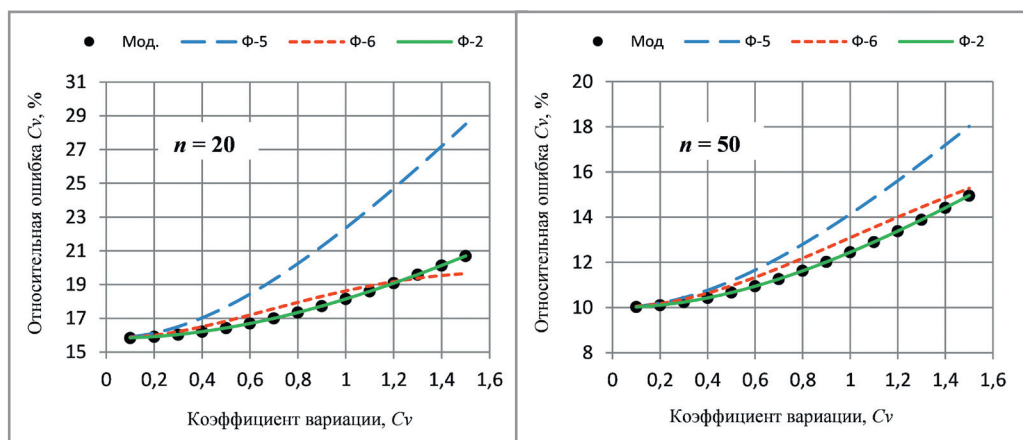


Рис. 3. Зависимости относительной ошибки коэффициента вариации от коэффициента вариации при различной длине ряда и $C_s/C_v = 2$, полученные по результатам моделирования и рассчитанные по формулам. Мод — по результатам моделирования; Ф-5 — по формуле (5); Ф-6 — по формуле (6); Ф-2 — по формуле (2) с переменным параметром a .

Fig. 3. The dependences of the relative error of the coefficient of variation on the coefficient of variation for different series lengths and $C_s/C_v = 2$, obtained from simulation results and calculated using formulas.

Mod — according to the results of modeling; Ф-5 — according to formula (5); Ф-6 — according to formula (6), Ф-2 — according to formula (2) with variable parameter a .

моделирование и формула Е. Г. Блохинова (6) тоже дают близкие результаты при любых значениях коэффициента вариации — разница не превышает 1 %.

Формула (5) завышает погрешность, особенно это заметно при больших значениях коэффициента вариации и малой длине выборок. Например, при $C_v = 1$ и $n = 50$ завышение 1,7 %, а при $n = 20$ завышение составляет 4,3 %.

3. Формула для расчета стандартной ошибки коэффициента вариации для выборок из распределения Пирсона III типа

Как показал дальнейший анализ, формулу (2) с переменным коэффициентом a можно использовать для любых выборок с распределением Пирсона III типа.

На основе модельных данных была получена обобщенная формула для определения коэффициента a в формуле (2):

$$a = b + ke^{-cn}, \quad (9)$$

где n — длина выборки; b , k и c — параметры, определяемые по табл. 1 в зависимости от отношения C_s/C_v .

Анализ показал, что при использовании параметров из табл. 1 формула (2) с переменным коэффициентом a при любых фиксированных n и C_v дает наименьшее значение стандартной ошибки C_v при приближении значения C_s/C_v к двум. При отклонении значения C_s/C_v от двух в любую сторону ошибка C_v начинает возрастать.

Таблица 1

Значения параметров формулы (9) в зависимости от C_s/C_v
Values of formula parameters (9) depending on C_s/C_v

$ C_s/C_v $	Параметры формулы		
	b	k	c
0	2,00	1,33	0,017
0,5	1,23	0,95	0,019
1	0,60	0,57	0,020
1,5	0,50	0,23	0,021
2	0,80	−0,75	0,022
2,5	1,23	−1,14	0,024
3	2,00	−2,07	0,025
3,5	3,07	−3,16	0,027
4	4,45	−4,41	0,028
5	8,13	−7,41	0,031
6	13,0	−11,1	0,034

Для проверки представленного алгоритма были построены графики зависимости стандартной ошибки коэффициента вариации от коэффициента вариации и длины ряда при различных значениях C_s/C_v с использованием формул (2) и (9). На этот же график были нанесены значения стандартных ошибок C_v из таблиц А. В. Рождественского (рис. 4). Как видно на этом рисунке, оба метода дают близкие значения.

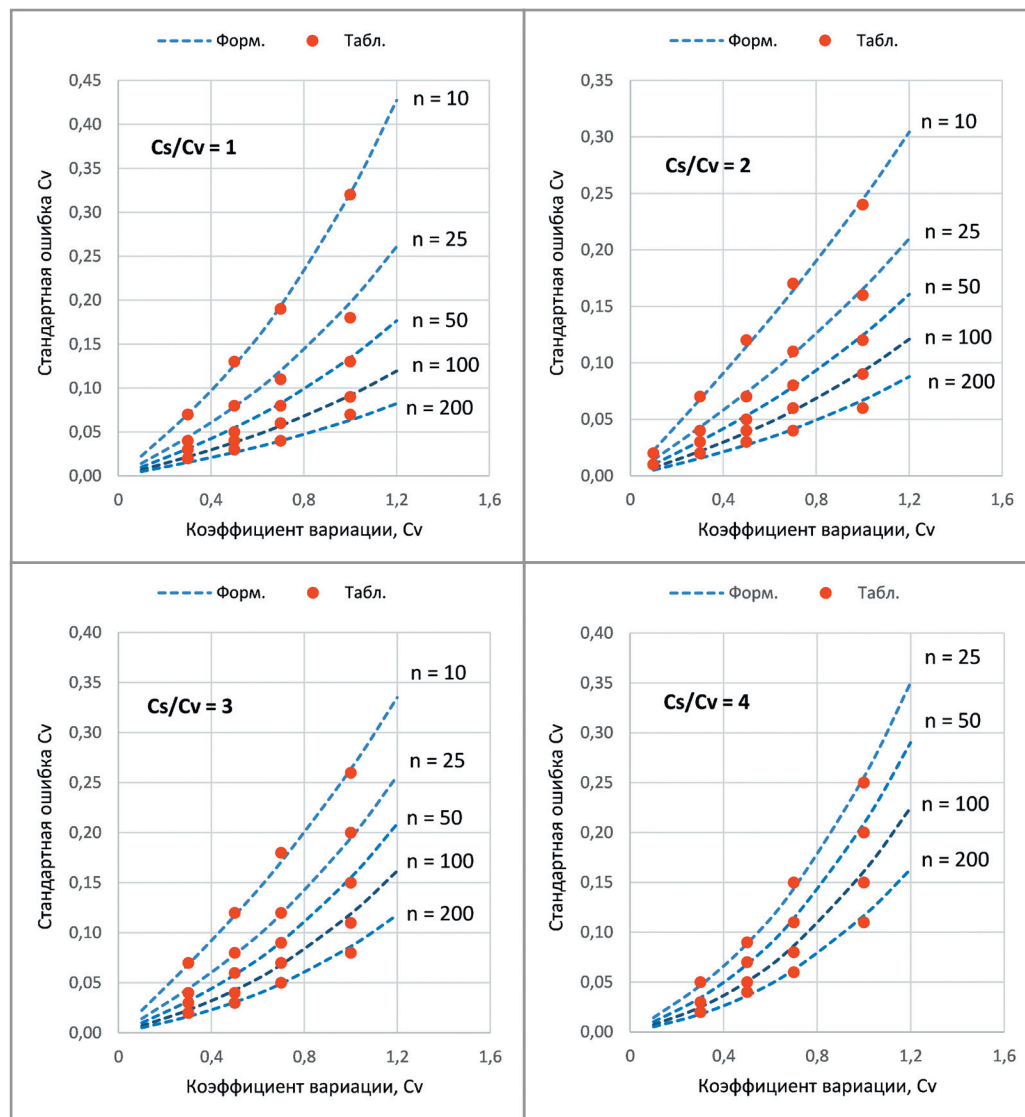


Рис. 4. Графики зависимости стандартной ошибки коэффициента вариации от коэффициента вариации и длины ряда при различных значениях C_s/C_v .

Форм. — расчет по формуле (2) с переменным значением параметра α ;
Табл. — значение из таблиц А. В. Рождественского.

Fig. 4. Graphs of the dependence of the standard error of the coefficient of variation on the coefficient of variation and the length of the series at different values of C_s/C_v .

Форм. — calculation according to formula (2) with a variable value of parameter α ;
Табл. — the value from the tables of A. V. Rozhdestvensky.

При наличии в рядах автокорреляции в формулу (2) допустимо вводить поправку, рекомендуемую в [1, 2]. В этом случае расчетное значение стандартной ошибки коэффициента вариации умножается на δ (где r — коэффициент автокорреляции):

$$\delta = 1 + \frac{3C_v r^2}{1 + r}. \quad (10)$$

Было также установлено, что при $0,5 \leq C_s/C_v \leq 3$ удовлетворительные результаты дает формула Е. Г. Блохинова (6). При $C_s/C_v > 3,5$ все формулы с постоянными коэффициентами дают существенное занижение стандартной ошибки коэффициента вариации.

Испытание методики было проведено на примере рядов максимальных расходов весеннего половодья рек Северо-Запада РФ. Для расчетов использовались только однородные и стационарные ряды. Всего было проанализировано 27 рядов продолжительностью от 53 до 81 года. Для каждого ряда рассчитывалась стандартные ошибки выборочного коэффициента вариации по разработанной методике и по формуле (6). При использовании параметров из табл. 1 эмпирическое значение C_s/C_v округлялось (с точностью до 0,5).

Оба метода показали близкие результаты: максимальное расхождение расчетных ошибок (Δ %) составило 1,2 %, а среднее — менее 1 % (табл. 2). Такое небольшое различие в расчетных значениях ошибок связано с тем, что отношение C_s/C_v для большинства исследуемых рядов находилось в диапазоне от 1 до 3, а коэффициенты вариации изменялись от 0,25 до 0,51. В этом случае, как отмечалось ранее, формула (6) дает удовлетворительные результаты и может использоваться для практических расчетов. Для рядов с высокой асимметрией ($C_s/C_v > 3,0$) можно рекомендовать предложенную методику или таблицы А. В. Рождественского [3].

Таблица 2

Результаты расчета относительных среднеквадратических ошибок коэффициентов вариации с использованием разработанной методики (ε_1) и формулы Блохинова (ε_2) для рядов максимальных расходов весеннего половодья рек Северо-Запада РФ

The results of calculating the relative standard errors of the coefficients of variation using the developed methodology (ε_1) and the Blokhinov formula (ε_2) for the series of maximum expenditures of the spring flood of the rivers of the North-West of the Russian Federation

Река – створ	n	C_v	C_s/C_v	b	k	c	a	$\varepsilon_{C_v}, \%$		$ \Delta \% = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 $
								ε_1	ε_2	
Гороховка — п. Токарево	66	0,25	4	4,5	-4,41	0,028	3,76	9,7	8,9	0,73
Тигода — ст. Любань	70	0,44	2	0,8	-0,75	0,022	0,64	9,0	9,1	0,17
Тосна — ст. Тосна	70	0,38	1	0,6	0,57	0,020	0,74	8,9	9,0	0,08
Ящера — д. Долговка	63	0,43	1,5	0,5	0,23	0,021	0,56	9,4	9,6	0,23
Шелонь — г. Порхов	59	0,48	2	0,8	-0,75	0,022	0,60	9,8	10,1	0,24
Цна — с. Жилотково	53	0,36	1	0,6	0,57	0,020	0,80	10,2	10,2	0,02
Рагнукса — д. Харловская	59	0,32	3	2,0	-2,07	0,025	1,53	9,9	9,6	0,30
Пяльма — д. Пяльма	62	0,34	1	0,6	0,57	0,020	0,76	9,4	9,4	0,05

Река – створ	n	C_v	C_s/C_v	b	k	c	a	$\varepsilon_{C_s}, \%$		$ \Delta \% = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 $
								ε_1	ε_2	
Перехода — д. Подсосонье	69	0,51	1,5	0,5	0,23	0,021	0,55	9,1	9,4	0,31
Паша — с. Часовенское	80	0,31	1	0,6	0,57	0,020	0,72	8,2	8,2	0,06
Паша — д. Поречье	80	0,32	1	0,6	0,57	0,020	0,72	8,2	8,3	0,07
Паша — д. Дуброво	80	0,34	2	0,8	-0,75	0,022	0,67	8,2	8,3	0,10
Орлинка — уроч. Орлинка	61	0,43	1,5	0,5	0,23	0,021	0,56	9,5	9,7	0,22
Немина — пос. Немино	57	0,34	1,5	0,5	0,23	0,021	0,57	9,7	9,8	0,14
Мста — пос. Потерпелицы	63	0,35	3	2,0	-2,07	0,025	1,57	9,7	9,4	0,36
Мста — д. Девкино	81	0,29	2	0,8	-0,75	0,022	0,67	8,1	8,1	0,07
Мерега — д. Куйтежа	66	0,33	4	4,5	-4,41	0,028	3,76	10,3	9,1	1,23
Мга — д. Горы	78	0,4	2	0,8	-0,75	0,022	0,67	8,4	8,6	0,13
Луга — г. Кингисепп	71	0,33	1	0,6	0,57	0,020	0,74	8,7	8,8	0,06
Дымка — д. Домачево	66	0,34	2	0,8	-0,75	0,022	0,62	9,0	9,1	0,12
Воложба — д. Пареево	63	0,32	1	0,6	0,57	0,020	0,76	9,2	9,3	0,04
Воложба — д. Воложба	79	0,37	2	0,8	-0,75	0,022	0,67	8,3	8,4	0,11
Видлица — с. Большие горы	79	0,44	2	0,8	-0,75	0,022	0,67	8,5	8,6	0,15
Великая — г. Опочка	65	0,39	3	2,0	-2,07	0,025	1,59	9,8	9,3	0,45
Б. Тудер — д. Бабяхино	69	0,4	2	0,8	-0,75	0,022	0,64	8,9	9,1	0,15
Пола — д. Налючи	65	0,26	1	0,6	0,57	0,020	0,76	9,0	9,0	0,03
Оять — д. Шангиничи	72	0,31	1,5	0,5	0,23	0,021	0,55	8,6	8,7	0,13
max	81	0,51	4							1,2
min	53	0,25	1							0,02
Среднее	68	0,36	1,87							0,21

Исследование стандартных ошибок коэффициента асимметрии

Для расчета стандартной ошибки коэффициента асимметрии предложена приближенная формула:

$$\sigma_{C_s} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{C_s}, \quad (11)$$

где σ_0 — стандартная ошибка C_s для нормального распределения, т. е. при $C_s = 0$; $\Delta\sigma_{C_s}$ — приращение стандартной ошибки коэффициента асимметрии при увеличении асимметрии ряда.

Стандартная ошибка коэффициента асимметрии для нормального распределения рассчитывается по формуле [12]:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n+1)(n-2)(n+3)}} \approx \sqrt{\frac{6}{n}}. \quad (12)$$

Приращение стандартной ошибки коэффициента асимметрии определялось обратным путем из формулы (11):

$$\Delta\sigma_{C_s} = \sigma_{C_s} - \sigma_0. \quad (13)$$

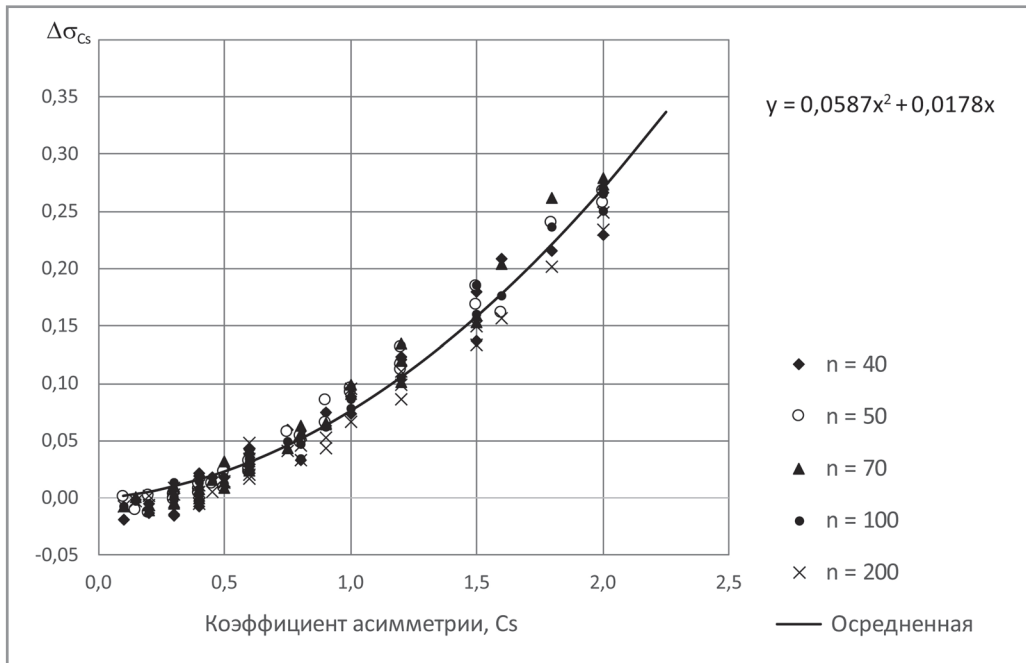


Рис. 5. Зависимость приращения стандартной ошибки коэффициента асимметрии от коэффициента асимметрии и длины ряда при $C_v \leq 0,6$ и $0 \leq C_s \leq 2$.

Fig. 5. Dependence of the increment of the standard error of the asymmetry coefficient on the asymmetry coefficient and the length of the series at $C_v \leq 0,6$ and $0 \leq C_s \leq 2$.

По результатам моделирования было установлено, что при $C_v \leq 0,6$; $0 \leq C_s \leq 2$ и длине выборок от 40 до 200 поправка $\Delta\sigma_{Cs}$ слабо зависит от коэффициента вариации и длины выборки, а зависит, главным образом, от коэффициента асимметрии, поэтому была построена осредненная зависимость $\Delta\sigma_{Cs} = f(C_s)$ (рис. 5). Зависимость была аппроксимирована полиномом второй степени с нулевым свободным членом:

$$\Delta\sigma_{Cs} = 0,0587C_s^2 + 0,0178|C_s|. \quad (14)$$

Следует отметить, что при больших значениях C_v и C_s выборочное значение C_s имеет существенную отрицательную смещенность и точность модельных оценок стандартной ошибки C_s снижается, поэтому при построении зависимости $\Delta\sigma_{Cs} = f(C_s)$ было введено ограничение на параметры.

С учетом формул (12) и (14) формула (11) принимает вид:

$$\sigma_{Cs} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n+1)(n-2)(n+3)}} + 0,0587C_s^2 + 0,0178|C_s|. \quad (15)$$

При длине ряда более 40 лет можно использовать упрощенный вариант формулы:

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n} + 0,0587C_s^2 + 0,0178|C_s|}. \quad (16)$$

Следовательно, относительную ошибку C_s при $C_s > 0$ можно определить по формуле:

$$\varepsilon_{C_s} = \frac{100}{C_s} \left(\sqrt{\frac{6}{n} + 0,0587C_s^2 + 0,0178|C_s|} \right) \%. \quad (17)$$

Для проверки формулы (16) строились зависимости стандартной ошибки коэффициента асимметрии от коэффициента асимметрии при различных значениях C_s/C_v и различной длине выборок. На график наносились значения σ_{C_s} , полученные по результатам моделирования, рассчитанные по формуле (16), полученные из таблиц Рождественского и рассчитанные по формуле Крицкого—Менкеля [16]:

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{(6/n)(1 + 6C_v^2 + 5C_v^4)}. \quad (18)$$

Для удобства сравнения формула (18) была преобразована к виду:

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{(6/n)(1 + 6(C_s/\psi)^2 + 5(C_s/\psi)^4)}, \quad (19)$$

где $\psi = C_s/C_v$.

При использовании данных из таблиц А. В. Рождественского применялось преобразование $C_s = \psi C_v$. В качестве примера на рис. 6 показаны зависимости $\Delta\sigma_{C_s} = f(C_s)$ для $C_s/C_v = 2$ и $C_s/C_v = 4$ при $n = 50$ и $n = 100$.

Как видно из графиков, формула (16) удовлетворительно описывает модельные точки и дает значения близкие к приведенным в таблицах А. В. Рождественского.

Формула (18) была разработана для двухпараметрического гамма-распределения, у которого $C_s/C_v = 2$. Однако, как показал анализ, формула соответствует этому положению только при большой длине рядов ($n = 500$). При длине ряда $n = 200$ формула дает решение, которое соответствует соотношению $C_s/C_v = 3$, а при длине ряда $n = 50$ формула дает решение, которое соответствует соотношению $C_s/C_v = 4$.

Выводы

В результате проведенных исследований получен двухэтапный алгоритм для оценки стандартной ошибки выборочного коэффициента вариации.

На первом этапе с использованием формулы (9) и таблицы 1 определяется параметр a . На втором этапе по формуле (2) рассчитывается стандартная ошибка коэффициента вариации. Представленный алгоритм можно рекомендовать для выборок любой продолжительности при C_s/C_v от 0 до 6.

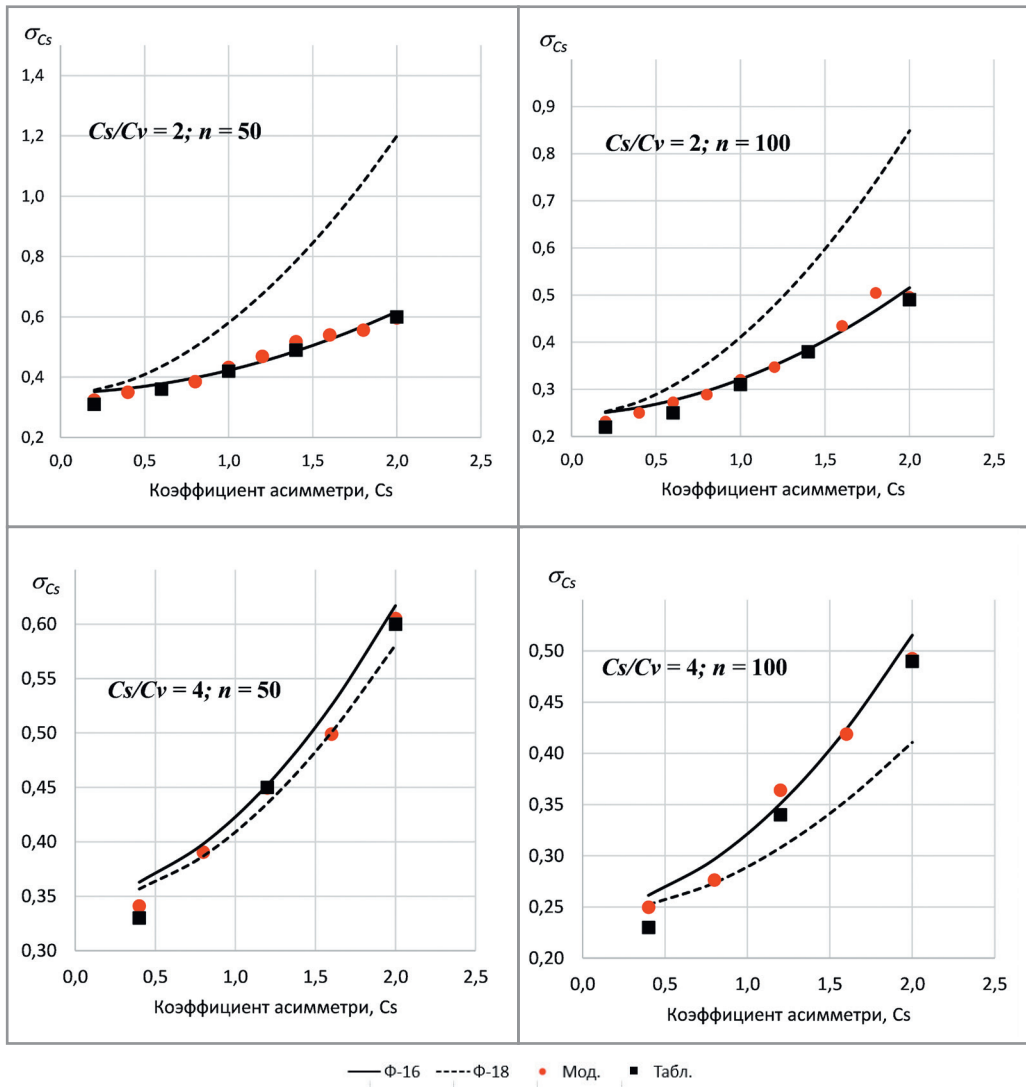


Рис. 6. Зависимость стандартной ошибки коэффициента асимметрии от коэффициента асимметрии для $C_s/C_v = 2$ и $C_s/C_v = 4$ при $n = 50$ и $n = 100$.

Φ-16 — расчет по формуле (16); Φ-18 — расчет по формуле (18); Мод. — модельные данные; Табл. — значения из таблиц А. В. Рождественского.

Fig. 6. Dependence of the standard error of the asymmetry coefficient on the asymmetry coefficient for $C_s/C_v = 2$ and $C_s/C_v = 4$ at $n = 50$ and $n = 100$.

Φ-16 — calculation by formula (16); Φ-18 — calculation by formula (18); Мод. — model data; Табл. — values from the tables of A. V. Rozhdestvensky.

Установлено, что при $0,5 \leq C_s/C_v \leq 3$ удовлетворительные результаты дает формула Блохинова (6).

Для расчета стандартной ошибки коэффициента асимметрии можно рекомендовать приближенные формулы (15) и (16).

Список литературы

1. Свод правил СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. // Минстрой России: офиц. сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/323116/> (дата обращения 19.06.2024).
2. Методические рекомендации по определению расчётных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. 134 с.
3. Рождественский А. В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 269 с.
4. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
5. Орлов А. И. Метод статистических испытаний в прикладной статистике // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 5. С. 67—79. doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-5-67-79.
6. Кузикова Д. С. Метод Монте-Карло в экономических исследованиях // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 34—3. С. 41—45. doi: 10.18411/lj-31-01-2018-42.
7. Самарин О. Д. Вероятностно-статистическое моделирование годового хода температуры наружного воздуха и ее значений в теплый период // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, № 3(114). С. 378—384. doi: 10.22227/1997-0935.2018.3.378-384.
8. Спирин Ю. А. Моделирование рядов среднегодовых расходов воды рек Разлив и Промысловая // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2021. № 2. С. 30—37. doi: 10.17308/geo.2021.2/3444.
9. Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Моделирование негауссова векторного процесса в приложении к гидрологии // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 559. doi: 10.7868/S032105961406008X.
10. Сикан А. В. Вероятностные распределения в гидрологии. Специальные главы теории и практики гидрологических расчетов: учебник. СПб.: РГТУ, 2020. 286 с.
11. Болгов М. В. Стохастическая гидрология: развитие основных идей в России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66, № 1. С. 19—40. doi: 10.21638/spbu07.2021.102.
12. Виссмен У. мл., Харбаф Т. И., Кнэпп Д. У. Введение в гидрологию. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 470 с.
13. Salas J. D., Arabi M., Green T. R. et al. Introduction to hydrology // Modern Water Resources Engineering, 2014. P. 1—126. doi: 10.1007/978-1-62703-595-8_1.
14. Агамиров Л. В., Агамиров Л. В., Агамиров В. Л., Вестяк В. А. Исследование распределения коэффициента вариации в задачах статистического анализа испытаний // Программные продукты и системы. 2018. № 1. С. 166—171. doi: 10.15827/0236-235X.121.166-171.
15. Болгов М. В., Филиппова И. А., Лобанова А. Г. Оценка погрешностей расчетных значений гидрологических характеристик при нарушении однородности рядов наблюдений // Метеорология и гидрология. 2023. № 6. С. 57—63. doi: 10.52002/0130-2906-2023-6-57-62.
16. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981. 270 с.
17. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
18. Блохинов Е. Г. Распределение вероятностей величин речного стока. М.: Наука, 1974. 169 с.

References

1. *Svod pravil SP 529.1325800.2023. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik = Code of Practice SP 529.1325800.2023. Definition of the Main Calculated Hydrological*

- Characteristics* // Ministry of Construction of Russia: official website. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/323116/> (accessed on: 06/19/2024). (In Russ.).
2. *Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri nalitykh dannyykh gidrometricheskikh nablyudeniy* = *Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the presence of hydrometric observation data*. Nizhny Novgorod: Vector-TiS, 2007; 134 p. (In Russ.).
 3. Rozhdestvensky A. V. *Otsenka tochnosti krivyykh raspredeleniya gidrologicheskikh kharakteristik* = *Assessment of the accuracy of distribution curves of hydrological characteristics*. L.: Gidrometeoizdat, 1977; 269 p. (In Russ.).
 4. Sobol I. M. *Metod Monte-Karlo* = *Monte Carlo Method*. M.: Nauka, 1968; 64 p. (In Russ.).
 5. Orlov A. I. Method of statistical tests in applied statistics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2019; 85(5): (67—79). doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-5-67-79. (In Russ.).
 6. Kuzikova D. S. Monte Carlo method in economic research. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* = *Trends in the development of science and education*. 2018; (34-3): (41—45). doi: 10.18411/lj-31-01-2018-42. (In Russ.).
 7. Samarin O. D. Probabilistic and statistical modeling of the annual course of the outdoor air temperature and its values during the warm period. *Vestnik MGSU* = *Bulletin of MGSU*. 2018; 13(3): (378—384). doi: 10.22227/1997-0935.2018.3.378-384. (In Russ.).
 8. Spirin Yu. A. Modeling series of average annual water discharges of the Razliv and Promyslovaya rivers. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* = *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2021; (2): (30—37). doi: 10.17308/geo.2021.2/3444. (In Russ.).
 9. Frolov A. V., Vyruchalkina T. Yu., Solomonova I. V. Modeling a non-Gaussian vector process in application to hydrology. *Vodnyye Resursy* = *Water resources*. 2014; 41(6): (559). doi: 10.7868/S032105961406008X. (In Russ.).
 10. Sikan A. V. *Raspredeleniya veroyatnostey v gidrologii. Spetsial'nyye glavy teorii i praktiki gidrologicheskikh raschetov: Uchebnik* = *Probability distributions in hydrology. Special chapters of the theory and practice of hydrological calculations: textbook*. SPb: RSHU, 2020; 286 p.
 11. Bolgov M. V. Stochastic hydrology: development of basic ideas in Russia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle* = *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2021; 66(1): (19—40). doi: 10.21638/spbu07.2021.102. (In Russ.).
 12. Vissman W. Jr., Harbaf T. I., Knapp D. W. *Vvedeniye v gidrologiyu* = *Introduction to hydrology*. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 470 p. (In Russ.).
 13. Salas J. D., Arabi M., Green T. R. et al. Introduction to hydrology. *Modern Water Resources Engineering*. 2014; 1—126. doi: 10.1007/978-1-62703-595-8_1.
 14. Agamirov L. V., Agamirov L. V., Agamirov V. L., Vestyak V. A. Study of the distribution of the variation coefficient in problems of statistical analysis of tests. *Programmnyye produkty i sistemy* = *Software products and systems*. 2018; (1): (166—171). doi: 10.15827/0236-235X.121.166-171. (In Russ.).
- 1) Bolgov M. V., Filippova I. A., Lobanova A. G. Estimation of errors in the calculated values of hydrological characteristics when the homogeneity of observation series is violated. *Meteorologiya i gidrologiya* = *Meteorology and hydrology*. 2023; (6): (57—63). doi: 10.52002/0130-2906-2023-6-57-62. (In Russ.).
15. Kritsky S. N., Menkel M. F. *Gidrologicheskiye printsipy upravleniya rechnym stokom* = *Hydrological foundations of river runoff management*. Moscow: Nauka, 1981; 270 p. (In Russ.).
 16. Rozhdestvensky A. V., Chebotarev A. I. *Statisticheskiye metody v gidrologii* = *Statistical methods in hydrology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974; 424 p. (In Russ.).
 17. Blokhinov E. G. *Veroyatnostnoye raspredeleniye znacheniy rechnogo stoka* = *Probability distribution of river runoff values*. Moscow: Nauka, 1974; 169 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Сикан Александр Владимирович, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, sikan07@yandex.ru.

Щеглов Денис Александрович, отдел русловых процессов ФГБУ «Государственный гидрологический институт», младший научный сотрудник, obyvanky45@gmail.com.

Information about authors

Sikan Alexander Vladimirovich, candidate of geographical sciences, associate professor, Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University.

Shcheglov Denis Alexandrovich, Department of Riverbed Processes Federal State Budgetary Institution State Hydrological Institute, Junior Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.07.2024

Принята после доработки в печать 24.11.2024

The article was received on 15.07.2024

The article was accepted after revision on 24.11.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 661—673.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):661—673.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [504.6:629.12](571.63-25)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-661-673

Экспериментальные исследования шумовых характеристик судов в акватории порта Владивосток

***Сергей Владимирович Горовой^{1, 2}, Алексей Валерьевич Кирьянов¹,
Яна Юрьевна Блиновская¹, Алексей Анатольевич Борейко³,
Даниил Александрович Пестов¹***

¹ ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия, kirianov.av@dvvfu.ru

² ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН», г. Владивосток, Россия

³ ФГБУН «Институт проблем морских технологий ДВО РАН», г. Владивосток, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема разработки и применения технических средств мониторинга шумового загрязнения морских акваторий вблизи крупных портов. Инструментальные исследования акустического воздействия с помощью оригинального оборудования и анализ полученных статистических данных показали, что основными источниками шума в порту Владивосток являются контейнеровозы и балкеры. Измерение шумовых характеристик в натурных условиях на якорных стоянках показало применимость использования разработанной аппаратуры. Показано, что полученные результаты могут быть использованы для формирования банка данных характеристик подводных шумов, проведения оценки воздействия на состояние окружающей среды и здоровье человека, а также разработки мероприятий по снижению негативного воздействия от шумовых полей.

Ключевые слова: шумовое загрязнение, экологический мониторинг, гидроакустика, морская среда, судоходство, морской порт.

Для цитирования: Горовой С. В., Кирьянов А. В., Блиновская Я. Ю. и др. Экспериментальные исследования шумовых характеристик судов в акватории порта Владивосток / С. В. Горовой, А. В. Кирьянов, Я. Ю. Блиновская, А. А. Борейко, Д. А. Пестов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 661—673. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-661-673.

Experimental studies of the noise characteristics of ships in the waters of the port of Vladivostok

**Sergey V. Gorovoy^{1, 2}, Alexey V. Kiryanov¹, Yana Yu. Blinovskaya¹,
Alexey A. Boreyko³, Daniil A. Pestov¹**

¹ FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Vladivostok, Russia

² FGBUN «Ilyichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS», Vladivostok, Russia

³ FGBUN «Institute of the Marine Technology Problems FEB RAS», Vladivostok, Russia

Summary. The environmental impact of anthropogenic activities has become global and often irreversible. Moreover, some types of pollution are very often underestimated due to their specific manifestation. This is noise. Sources of anthropogenic noise in the oceans include marine cargo transportation, fishing activities, the search, development and operation of offshore mineral resources, energy generation facilities (wind and tidal power plants). Noise on ships is generated by engines, propellers, onboard equipment. The solution to this problem is impossible without the use of an integrated approach, which includes monitoring of marine noise at different stages of the technological process, the acoustic database from different sources on different work conditions, the development of technical monitoring tools, as well as standardized methods that make it possible to obtain reliable data on anthropogenic noise in the sea. The main objective of the experimental studies was to test the registration of hydroacoustic signals perceived by vertically spaced non-directional hydrophones near the route along which sea vessels enter/exit the Vladivostok port water area and assess the time dependence of the spectral and statistical characteristics of the registered signals, including when ships passage. Analysis of the signals obtained using a 4-element vertical antenna array from pressure hydrophones with sensitivity of $300 \pm 30 \mu\text{V}/\text{Pa}$ in the frequency range of $1 \approx 5000 \text{ Hz}$ and electric capacitances of $6 \pm 0.5 \text{ nF}$ shows that the dependence of the levels of the signals perceived by the hydrophones on the distance between the container ship and the receiving antenna is not described by a spherical or cylindrical law. It has been established that the main part of noise emission is concentrated at frequencies up to $400\text{—}1000 \text{ Hz}$, which is due to wave effects during signal propagation in shallow sea conditions. As the speed of the vessel increases, there is an increase in noise emission energy in the higher frequencies due to the propeller operation. The results obtained indicate the applicability of the developed antenna array for monitoring shipping noise and can be used in the development of recommendations for reducing acoustic exposure, implemented as part of the activities of the IMO program subcommittee to prevent and reduce underwater noise from ships.

Keywords: noise pollution, environmental monitoring, hydroacoustic, marine environment, shipping, seaport.

For citation: Gorovoy S. V., Kiryanov A. V., Blinovskaya Y. Yu., et al. Experimental studies of the noise characteristics of ships in the waters of the port of Vladivostok. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):661—673. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-661-673.

Введение

Воздействие антропогенной деятельности на окружающую среду приобрело глобальный и часто необратимый характер. При этом некоторые виды загрязнения очень часто недооцениваются в силу их специфичного проявления. Таковым является шум. Звуковой фон в урбанизированных районах ежегодно увеличивается на $0,5\text{—}1 \text{ дБ}$, что создает существенные социальные и экологические угрозы для

населения [1]. Данная проблема также существует в пределах морских акваторий, например, при осуществлении судоходства, где источник загрязнения и объекты воздействия находятся в тесной связи друг с другом. Безусловно, она пока менее яркая по сравнению с разливами нефти и нефтепродуктов или образованием отходов, в том числе пластиковых, но, учитывая масштабы научно-технического прогресса, развитие навигации и рост грузооборота уже сейчас требуется поиск решений, способных нивелировать негативное воздействие шума как на здоровье человека, так и на представителей морских экосистем. Распространение акустических волн имеет особую специфику в морской воде, и их негативное влияние на живую среду не вызывает сомнения. Так, для большинства рыбопромысловых судов спектр гидроакустических шумов находится в диапазоне от единиц герц до нескольких килогерц, а максимальный спектральный уровень шума наблюдается на частотах до 500 Гц [2]. При этом у рыб диапазон воспринимаемых частот составляет 0,1—2000 Гц, а максимальная слуховая чувствительность у большинства видов наблюдается на частоте 20—500 Гц [3, 4].

К источникам антропогенного шума в Мировом океане относятся морские грузоперевозки, рыбопромысловая деятельность, поиск, разработка и эксплуатация морских месторождений полезных ископаемых, объекты энергогенерации (ветро- и приливно-отливные электростанции). При этом наиболее масштабными являются различные типы судов. Шумы на судах генерируют двигатели, гребные винты, бортовое оборудование. Помимо этого, шумы формируются при движении судна за счет обтекания корпуса водой при движении или при волновом воздействии во время стоянки, а также во время иной деятельности, осуществляемой на судне. Также шумы генерируются в ходе естественных природных процессов, что также успешно моделируется [5] и может быть учтено при оценке антропогенных шумов.

Понимая все нежелательные последствия, связанные с акустическим воздействием, Международная морская организация (ИМО, International Maritime Organization, IMO) еще в 2008 г. утвердила программу по разработке рекомендаций по снижению шумности коммерческих судов. В начале 2024 г. подкомитет ИМО по проектированию и конструкции судна согласовал План действий по дальнейшему предотвращению и снижению подводного шума от судна, а также были разработаны поправки к главе II-1 конвенции СОЛАС (Международная конвенция по охране человеческой жизни на море, International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS) [6]. Разработанные рекомендации содержат перечень проектных, технических, эксплуатационных и ремонтных мероприятий по снижению шумности, которые необходимо применять как для новых, так и для эксплуатирующихся судов. Отдельная проблема связана с ростом шумового воздействия в Арктике. Геополитические, экономические и экологические изменения, происходящие в современном мире, привели к повышенному интересу к Северному морскому пути (СМП), где ежегодно отмечается увеличение навигационной активности. Рабочая группа по защите морской арктической среды, действующая при Арктическом совете (Protection of the Arctic marine environment Arctic Council, PAME) с 2017 г. изучает эту проблему. Арктика характеризуется наличием чувствительных и уязвимых к антропогенным воздействиям, в том числе шумам, объектов живой

природы, прежде всего, морских млекопитающих, которые тяжело адаптируются к изменениям шумовой нагрузки [7]. Решение данной проблемы невозможно без применения комплексного подхода, включающего мониторинг морских шумов на разных этапах технологического процесса, данные о которых должны формировать акустическую базу данных, разработку технических средств мониторинга, а также стандартизированных методик, позволяющих получать достоверные данные об антропогенных шумах в морской акватории [8].

Все это обуславливает актуальность проведенного исследования, основой которого является апробация четырехэлементной вертикальной приемной антенной решетки, разработанной для исследования характеристик подводного шума, необходимых, в том числе, и для решения экологических задач, а также формирования массива для банка данных характеристик подводного шумового фона.

Таким образом, целью исследования является проведение натурного эксперимента по регистрации шумовых характеристик судна в процессе разных режимов его работы, а также возможности применения разработанной технологии для акустического мониторинга в морских портах.

Материалы и методы

Основная задача экспериментальных исследований состояла в пробной регистрации гидроакустических сигналов, воспринимаемых разнесенными по вертикали ненаправленными гидрофонами вблизи трассы, по которой осуществляется вход (выход) морских судов в акваторию порта Владивосток и оценивание зависимости от времени спектральных и статистических характеристик зарегистрированных сигналов, в том числе при проходе судов. По состоянию на текущий момент методические подходы, регламентирующие гидроакустические измерения, ориентированные на решение задач морской экологии, отсутствуют. Вместе с тем, в странах Евросоюза уже принят ряд стандартов и рекомендаций, основные из которых учтены при проведении эксперимента [9, 10].

Полигоном для исследований, основная часть которых реализована в октябре 2024 г., выбрана акватория морского порта Владивосток в районе якорных стоянок № 164А и № 175А (рис. 1). Данный участок отличается высокой интенсивностью судоходства, высокой степенью маневрирования судов (поворот, замедление и ускорение хода, прием и высадка лоцманов). Все эти действия приводят к изменениям подводного звукового поля. При этом глубины здесь составляют около 20—30 метров, а при прохождении судов длиной более 100 м и осадкой более 5 м отмечаются гидродинамические возмущения водных масс, причем в трех милях находится свал глубин.

Во время регистрации сигналов судно стояло на якорю, соблюдался режим тишины, для электропитания аппаратуры использовались аккумуляторы. Для обработки зарегистрированных сигналов применялись программные средства собственной разработки. С использованием автоматической идентификационной системы (АИС, Automatic Identification System — AIS) [11] проводилось отслеживание перемещений судов, фиксировались их координаты и скорость.

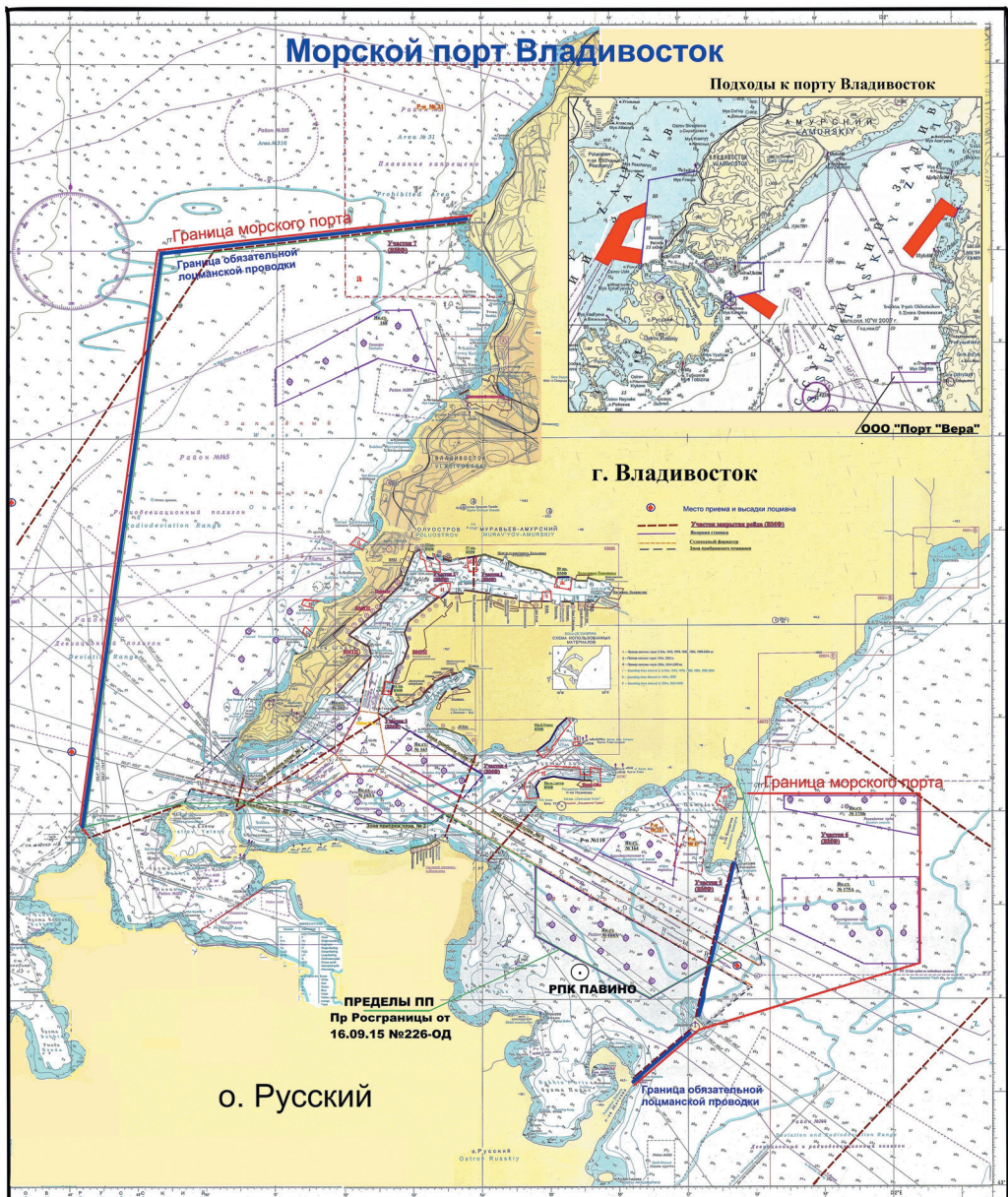


Рис. 1. Границы морского порта Владивосток.

Fig. 1. Vladivostok seaport boundaries.

Кроме того, весьма важными являлись вопросы выбора частотного диапазона, количества приемных элементов, направленных свойств и места установки приемных гидроакустических антенн, предназначенных для экологического

мониторинга. Поскольку в районе работ не ведутся буровзрывные, дноуглубительные и другие «шумные» работы, а также морские исследования сейсмическими методами, то основными источниками подводного шумоизлучения являются проходящие суда, основная часть которых сосредоточена на частотах до 1 кГц. Учитывая диапазон глубин в районе работ и необходимость учета влияния модовой структуры акустического поля, характерного для мелкого моря [12], представлялось целесообразным использование не одиночного гидрофона, а нескольких расположенных вертикально. Это позволило учитывать влияние модовой структуры и зависимость результатов от глубины установки приемных элементов [9, 10], особенно при оценивании абсолютных уровней звукового давления.

Используемые для целей экологического мониторинга и выявления наиболее интенсивных источников подводного шума технические средства не должны были располагаться далеко от основных источников подводного шума — движущихся судов, но в то же время не должны препятствовать их движению, в том числе при неблагоприятных погодных условиях.

При выполнении исследований судно с приемной антенной и аппаратурой регистрации поступающих с нее сигналов стояло на якоре в точке, местоположение которой обозначено звездой на рис. 1. Глубина места в точке установки антенны составляла 22 м, грунт в нем был с заиленными песками и с редким валунником. Волнение в этом месте не превышало 3 баллов по шкале Бофорта.

В качестве приемной антенны использовалась гибкая четырехэлементная вертикальная антенная решетка собственной разработки из гидрофонов давления с чувствительностями (без усилителей) 300+30 мкВ/Па в диапазоне частот 1—5000 Гц и электрическими емкостями 6+0,5 нФ. Конструкция данной антенной решетки позволяет изменять расстояния между гидрофонами.

Результаты и обсуждение

Морской порт Владивосток является одним из крупнейших портов России, его грузооборот в 2023 г. составил 33,51 млн тонн. При этом также растет количество судозаходов с целью бункеровки или при штормовой угрозе. На рис. 2 приведена динамика судозаходов в порт Владивосток за последнее десятилетие. Следует отметить, что в порту отмечается устойчивый рост заходов контейнеровозов (рис. 3), причем их число в 2023 г. превышало число заходов других судов почти в 5 раз.

Учитывая преобладающую долю судов данного типа в структуре заходов, в качестве объекта исследования был выбран контейнеровоз длиной 188 м, шириной 30 м, с осадкой во время движения по данным автоматической идентификационной системы (АИС) 7 м и водоизмещением более 30000 регистровых тонн. Контейнеровоз начал движение с якорной стоянки в проливе Босфор Восточный в сторону открытой части залива Петра Великого. Зависимость от времени расстояния до контейнеровоза во время эксперимента приведена на рис. 4. Минимальное расстояние до судна составляло 1589 м, скорость контейнеровоза относительно донного грунта по данным АИС составляла 2 м/с в начале движения и 8 м/с после прохода створа между маяками о. Скрыплева и м. Басаргина. Точность взаимного положения судна с приемной антенной и контейнеровоза составила около ± 2 м.

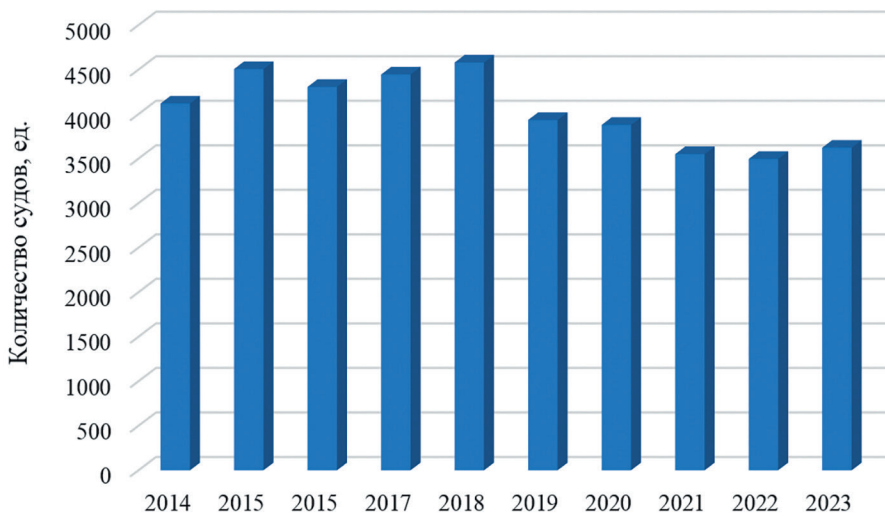


Рис. 2. Динамика судозаходов в порт Владивосток.

Fig. 2. The ship calls to the port of Vladivostok dynamics.

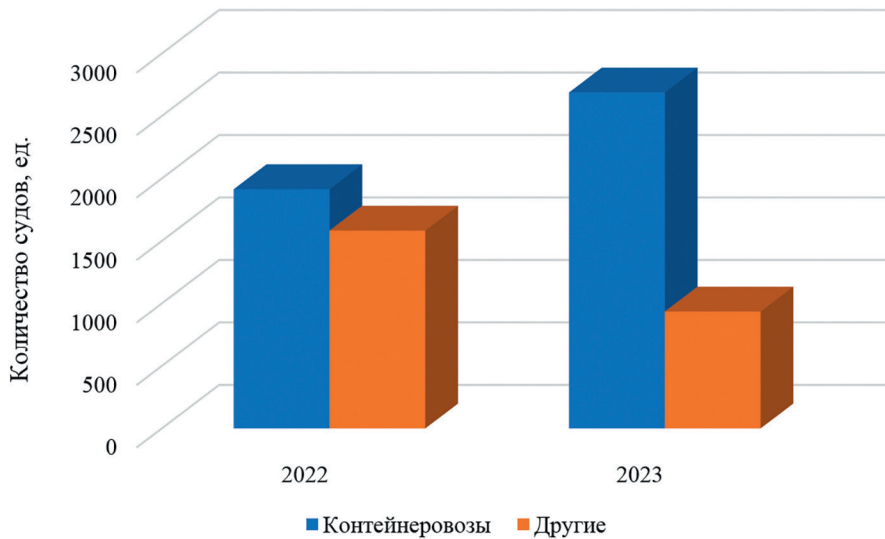


Рис. 3. Соотношение судозаходов разных типов судов.

Fig. 3. Ratio of the vessels different types calls.

На рис. 5 показаны осциллограммы сигналов y_1 , y_2 , y_3 , y_4 , поступавших с входящих в состав антенной решетки гидрофонов №1—№4, при прохождении контейнеровоза. Глубины погружения гидрофонов составляли 2, 4, 7,5 и 9,5 м,

причем ближайшим к поверхности моря был гидрофон № 1. Фактические отклонения положений гидрофонов от указанных значений под действием течения не превышали 0,1 м. Осциллограммы имеют вид шумовых дорожек с выбросами, вызванными волнением и плавными нарастаниями уровней, обусловленными

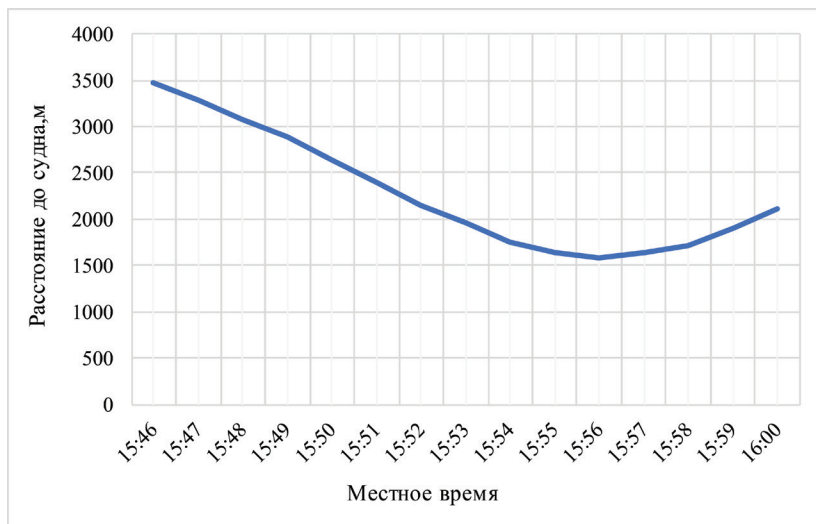


Рис. 4. Зависимость от времени расстояния до судна во время эксперимента.

Fig. 4 Time dependence of the distance to the vessel during the experiment.

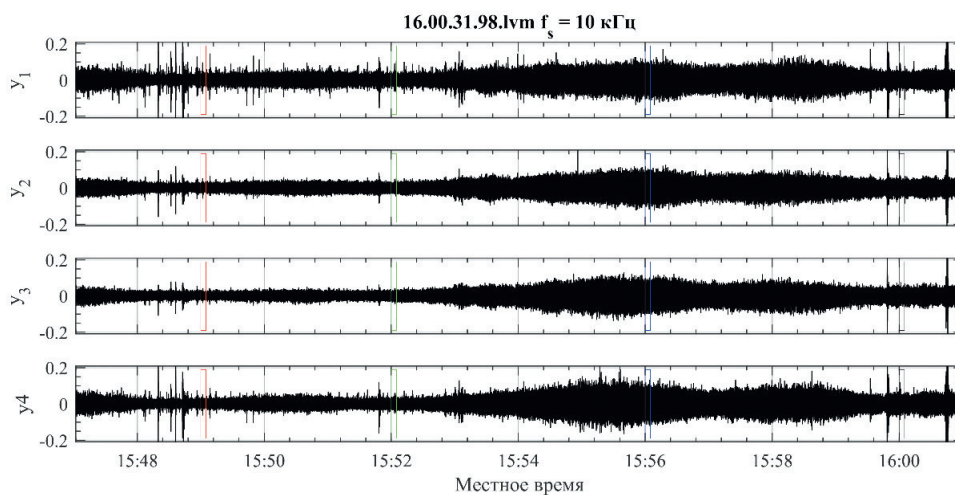


Рис. 5. Осциллограммы сигналов, зарегистрированных с помощью гидрофонов вертикальной антенной решеткой.

Fig. 5. Vertical antenna array signals oscillograms recorded using hydrophones.

изменениями расстояния между контейнеровозом и приемной антенной, а также волноводными эффектам [12].

Картины изменения уровней сигналов на разных гидрофонах различаются, замечен сдвиг по времени максимумов вблизи 15:54 ч, что обусловлено волноводными эффектами. Уровни сигналов условные, при этом можно считать, что для сигнала y_4 вблизи 15:52 ч они соответствуют уровням шумов глубокого моря при состоянии моря 5 баллов. Детальный анализ показывает, что зависимости уровней воспринимавшихся гидрофонами сигналов от расстояния между контейнеровозом и приемной антенной не описываются сферическим или цилиндрическим законом [13]. Это обусловлено тем, что в данном случае в качестве точечной модели источник шумоизлучения (контейнеровоза) представить нельзя в отличие от условий глубокого моря и больших расстояний [14, 15].

На рис. 6 приведены спектрограммы данных сигналов в частотных полосах шириной 10 Гц. Видны различия для гидрофонов, расположенных на разных

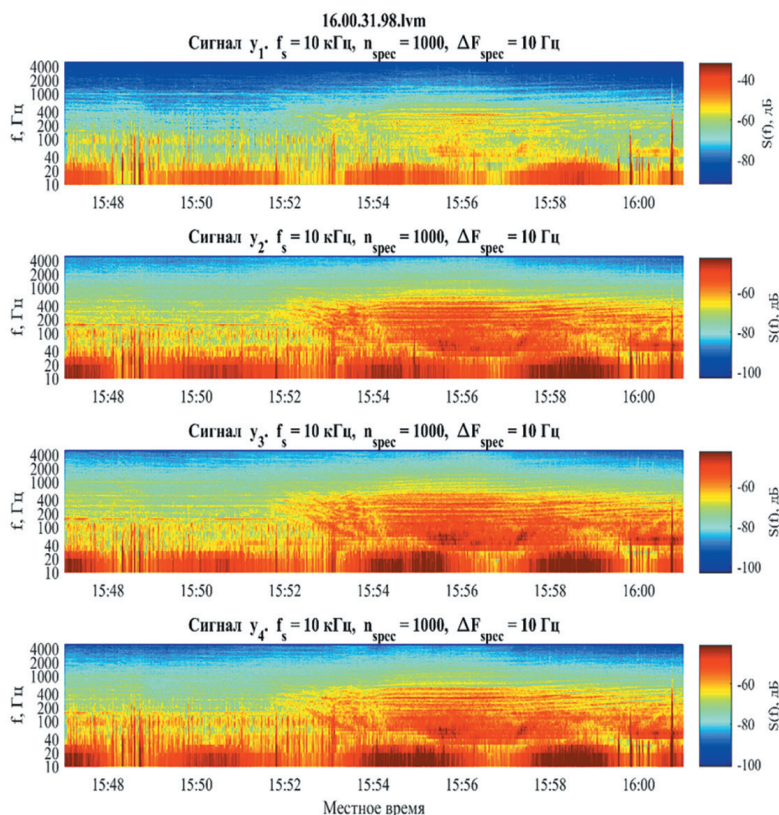


Рис. 6. Спектрограммы сигналов, зарегистрированных с помощью гидрофонов вертикальной антенной решетки.

Fig. 6. Spectrograms of signals recorded using vertical antenna hydrophones.

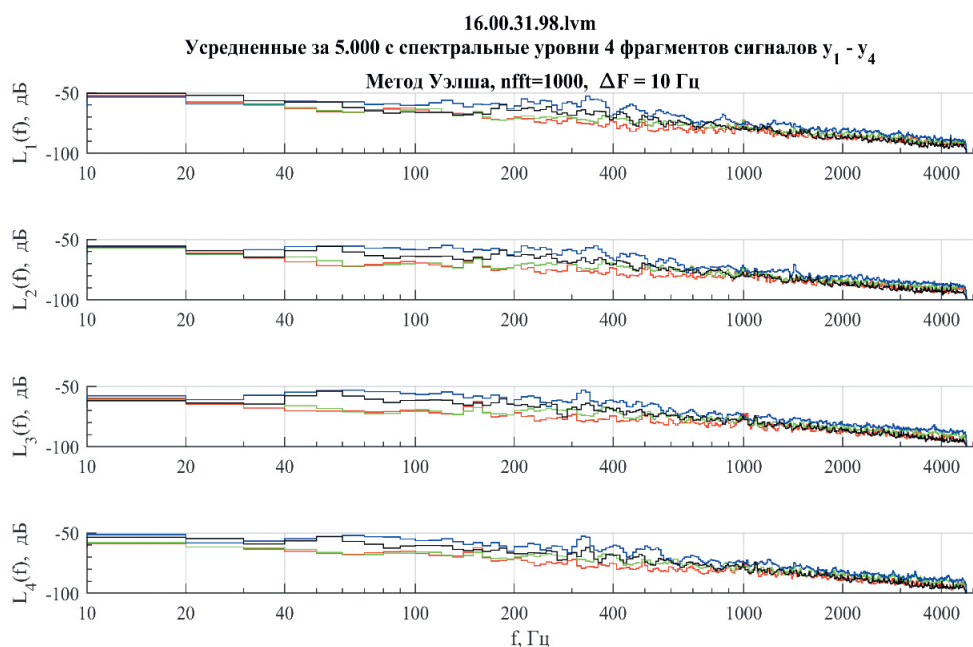


Рис. 7. Спектральные уровни сигналов, зарегистрированных с помощью гидрофонов вертикальной антенной решетки.

Fig. 7. Spectral levels of signals recorded using vertical antenna array hydrophones.

глубинах. Основная часть энергии шумоизлучения сосредоточена на частотах до 400—1000 Гц, что обусловлено волновыми эффектами при распространении сигналов в условиях мелкого моря.

Усредненные за 5 с спектральные уровни сигналов в полосах шириной 10 Гц, зарегистрированных с помощью гидрофонов вертикальной антенной решетки для нескольких интервалов времени показаны на рис. 7. У данного контейнеровоза практически отсутствуют дискретные составляющие в спектре шумоизлучения, что является признаком удовлетворительного технического состояния его механизмов.

Выводы

По данным ассоциации морских портов России, отмечается рост грузооборота и судозаходов судов различных типов во все отечественные порты, что приводит к повышению акустической нагрузки на окружающую среду, связанному с деятельностью судов. При этом в результате изменения мирового логистического рынка отмечается рост контейнерных перевозок в Азиатско-Тихоокеанском регионе, причем в 2022—2023 гг. выявлен их рост на 40 %. Это определило выбор объекта (порт Владивосток) для проведения натурного эксперимента.

В результате проведенных натурных испытаний можно сделать следующие выводы:

— Морские суда являются источниками акустического воздействия, что приводит к экологической деформации среды. При этом основными источниками шума на судах являются главный двигатель и вспомогательное оборудование, реализующее судовой технологический процесс.

— Четырехэлементная вертикальная приемная антенная решетка позволяет получать комплексные характеристики подводного шума, данные которых могут быть использованы для формирования базы данных шумов и в дальнейшем — для разработки инженерных решений по снижению негативного воздействия на окружающую среду и здоровье персонала.

— Зависимости уровней сигналов от расстояния между контейнеровозом и приемной антенной не соответствуют сферическому и цилиндрическому законам.

— Судно генерирует постоянную низкочастотную составляющую шума в диапазоне до 40 Гц независимо от скорости движения. При увеличении скорости судна отмечается рост энергии шумоизлучения в области более высоких частот, обусловленный работой гребного винта.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о применимости разработанной антенной решетки для мониторинга шумов судоходства и могут быть использованы при разработке рекомендаций по снижению акустического воздействия, реализуемых в рамках деятельности программного подкомитета ИМО по предотвращению и снижению подводного шума от судов.

Список литературы

1. Лыков И. Н., Николаева Т. С., Рахимов К. В. Экологические и социальные аспекты шумового загрязнения окружающей среды // *Экология урбанизированных территорий*. 2019. №2. С. 80—84. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-12080.
2. Mitson R. B., Knudsen H. P. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation // *J. Aquat. Living Resour.* 2003. Vol.16. No. 3. P. 255—263.
3. Кузнецов М. Ю., Поляничко В. И., Убарчук И. А., Сыроваткин Е. В. Влияние гидроакустического шума судна на эхоинтеграционные оценки запасов рыб и уловистость учетного трала (на примере минтая Охотского моря) // *Известия ТИНРО*. 2017. Том 190. Вып. 3. С. 85—100. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2017-190-127>.
4. Popper A. N., Fay R. R., Platt C., Sand O. Sound Detection Mechanisms and Capabilities of Teleost Fishes. /In: Collin S.P., Marshall N.J. (eds.) *Sensory Processing in Aquatic Environments*. Springer, New York, 2003. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22628-6_1.
5. Чешм Сиахи В., Кудрявцев В. Н., Юровская М. В. Параметрическая модель поверхностных волн в приложении к Арктическим морям // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 64. С. 515—530. DOI 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530.
6. Ship energy efficiency and underwater radiated noise // International Maritime Organization. URL: <https://www.imo.org/en/About/Events/Pages/URN-Workshop-2023.aspx> (дата обращения: 05.11.2024).
7. Underwater noise pollution from shipping in the Arctic // Arctic Council working Group. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://pame.is/ourwork/arctic-shipping/current-shipping-projects/underwater-noise-in-the-arctic/>. (дата обращения: 05.11.2024).
8. Таровик В. И. Постановка задачи о техногенном подводном шуме как факторе государственной морской промышленной и транспортной политики // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2021. № 3(397). С. 115—126. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-3-397-115-126.

9. Underwater Noise from Ships, Full Scale Measurement // WP 3 – Measurements. D 3.1 European URN Standard Measurement Method 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.ittc.info/media/8183/75-04-04-01.pdf>. (дата обращения: 05.11.2024).
10. Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement // Tethys. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/gpg133underwater.pdf>. (дата обращения: 05.11.2024).
11. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems // Testers for Marine Radios, EPIRBs and AIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://gmdsstesters.com/downloads/docs/IEC61993.pdf>. (дата обращения: 05.11.2024).
12. Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
13. Бутырский Е. Ю. Теоретические основы гидроакустики и акустики океана. Санкт-Петербург: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2022. 738 с. DOI 10.37468/book_171022.

References

1. Lykov I. N., Nikolaeva T. S., Rakhimov K. V. Environmental and social aspects of noise pollution. *Ecologiya urbanizirovannykh territoriy = Ecology of urbanized areas*. 2019. (2): 80—84. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-12080. (in Russ.).
2. Mitson R. B., Knudsen H. P. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation. *J. Aquat. Living Resour.* 2003;16(3): 255—263.
3. Kuznetsov M. Yu., Polyanichko V. I., Urbachuk I. A., Syrovatkin E. V. Impact of hydroacoustic noise of the vessel on echo-integration estimates of fish stocks and capture trawl (on the example of the Sea of Okhotsk pollock). *Izvestiya TINRO = TINRO news*. 2017. 190(3): 85—100. DOI:10.26428/1606-9919-2017-190-127. (in Russ.).
4. Popper A. N., Fay R. R., Platt C., Sand O. Sound Detection Mechanisms and Capabilities of Teleost Fishes. In: Collin S.P., Marshall N.J. (eds.) *Sensory Processing in Aquatic Environments*. Springer, New York, 2003. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22628-6_1.
5. Cheshm Siakhi V., Kudryavtsev V., Yurovskaya M. Parametric model of surface waves applied to the Arctic seas. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021; (64): (515—530). DOI 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530. (in Russ.).
6. Ship energy efficiency and underwater radiated noise. International Maritime Organization. Available at: <https://www.imo.org/en/About/Events/Pages/URN-Workshop-2023.aspx> (accessed on: 05.11.2024).
7. Underwater noise pollution from shipping in the Arctic. Arctic Council working Group. Available at: <https://pame.is/ourwork/arctic-shipping/current-shipping-projects/underwater-noise-in-the-arctic/> (accessed on: 05.11.2024).
8. Tarovik V. Formulation of technogenic underwater noise problem as a factor of state marine and transport policy. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra = Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021; 3(397):(115—126). DOI: 10.24937/2542-2324-2021-3-397-115-126. (in Russ.).
9. Underwater Noise from Ships, Full Scale Measurement. WP 3 Measurements. D 3.1 European URN Standard Measurement Method 2014. Available at: <https://www.ittc.info/media/8183/75-04-04-01.pdf> (accessed on: 05.11.2024).
10. Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement. Tethys. Available at: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/gpg133underwater.pdf> (accessed on: 05.11.2024).
11. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems. Testers for Marine Radios, EPIRBs and AIS. Available at: <https://gmdsstesters.com/downloads/docs/IEC61993.pdf> (accessed on: 05.11.2024).
12. Katsnelson B., Petnikov V. *Acustica melkogo moray = Acoustics of the shallow sea*. A textbook. Moscow: Nauka. 1997: 191 p. (in Russ.).
13. Butyrskiy E. Yu. *Theoreticheskie osnovy gidroacustiki i akustiki okeana = Theoretical foundations of hydroacoustics and ocean acoustics*. A textbook. St. Peterburg: Information Publishing Educational and Scientific Center «Strategy of the Future». 2022: 738 p. DOI 10.37468/book_171022. (in Russ.).

Сведения об авторах

Горовой Сергей Владимирович, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Политехнический институт, департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения, доцент, e-mail: gorovoy.sv@dvfu.ru.

Кириянов Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Политехнический институт, департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения, доцент, e-mail: kirianov.av@dvfu.ru.

Блиновская Яна Юрьевна, д-р техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Политехнический институт, департамент природно-технических систем и техносферной безопасности, профессор, e-mail: blinovskaia.iaiu@dvfu.ru.

Борейко Алексей Анатольевич, канд. техн. наук, ФГБУН «Институт проблем морских технологий ДВО РАН», заместитель директора по научной работе, e-mail: boreyko@marine.febras.ru.

Пестов Даниил Александрович, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Политехнический институт, департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения, аспирант, e-mail: pestov.da@dvfu.ru.

Information about authors

Gorovoy Sergey Vladimirovich, FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Polytechnical institute, department of electronics, telecommunications and instrumentation engineering, associate professor.

Kiryanov Alexey Valerievich, PhD (Tech. Sci.), FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Polytechnical institute, department of electronics, telecommunications and instrumentation engineering, associate professor.

Blinovskaya Yana Yurievna, Grand PhD (Tech. Sci.), associate professor, FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Polytechnical institute, natural and technical system and technospherical safety department, professor.

Boreyko Alexey Anatolyevich, PhD (Tech. Sci.), FGBUN «Institute of the Marine Technology Problems FEB RAS», Deputy Director for Research.

Pestov Daniil Alexandrovich, FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Polytechnical institute, department of electronics, telecommunications and instrumentation engineering, post-graduate student.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.11.2024

Принята к печати 13.12.2024

The article was received on 12.11.2024

The article was accepted on 13.12.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 674—688.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):674—688.

Научная статья

УДК [551.465.1:639.24](265.1)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688

Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга

***Джимми Хуан Мартина-Васкес, Светлана Михайловна Гордеева,
Валерий Николаевич Малинин***

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
jimmymartinavasquez@gmail.com.

Аннотация. В данной работе рассматривается построение статистических моделей вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга за период с 1996 г. по 2020 г. на основе данных о температуре поверхностного слоя океана и рассчитанным значениям индекса апвеллинга, который определялся по скорости ветра в приводном слое атмосферы на основе теории Экмана. С этой целью использовались два метода: множественная линейная регрессия (МЛР) и дерево решений (ДР, decision trees). Показано, что они не только с высокой точностью описывают дисперсию индекса биомассы анчоуса *CPUE*, но и позволяют прогнозировать его на несколько лет. При этом метод ДР показал некоторые преимущества по сравнению с методом МЛР.

Ключевые слова: Перуанский апвеллинг, индекс апвеллинга, улов на единицу усилия, множественная линейная регрессия, дерево решений.

Для цитирования: Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 674—688. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688.

Original article

Statistical modeling and forecasting of anchovy catch in the peruvian upwelling area

Jimmy Juan Martina-Vasquez, Svetlana M. Gordeeva, Valery N. Malinin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian Federation

Summary. This paper considers the construction of statistical models of anchovy catch in the Peruvian upwelling area for the period 1996—2020 based on the temperature of the ocean surface layer and calculated values of the upwelling index, which was determined by means of the wind speed in the atmospheric surface layer based on the Ekman theory. The catch per unit of fishing effort (*CPUE*) served as the anchovy biomass index. The Peruvian upwelling (PA) region was taken from 4° S to 40° S and was divided into 11 rectangular areas. For each area, the average annual values of the upwelling index (U_i) and Sea Surface Temperature values (T_i) were computed. Thus, the original sample included 22 variables. When constructing statistical models, two methods were used: multiple linear regression (MLR) and decision trees (DT). The optimal *CPUE* model using the MLR method includes 5 variables, the first being the upwelling index

© Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н., 2024

in the region 9, which describes 53% of the *CPUE* variance. At step 5, the variables describe 88 % of the *CPUE* variance. The DT model has a higher rate of growth of the determination coefficient and reduction of the standard error of the model. Already at the third branch, its accuracy reaches the accuracy of the MLR model at step 5. At the first branch, the U_9 describes 67 % of the *CPUE* variance, and it is included in the model twice (at branches 1 and 3). An experimental *CPUE* forecast for 2017—2020 using both models showed full compliance between the actual and predicted *CPUE* values. The successful use of these methods is largely due to the upwelling index in the region 9, which describes more than half of the *CPUE* variance using the MLR method and two-thirds using the DT method.

Keywords. Peruvian upwelling, upwelling index, catch per unit of effort, multiple linear regression, decision trees.

For citation: Martina-Vasquez J. J., Gordeeva S. M., Malinin V.N. Statistical modeling and forecasting of anchovy catch in the Peruvian upwelling area. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):674—688. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688.

Введение

К числу наиболее продуктивных областей апвеллинга в Мировом океане (МО) относится Перуанский апвеллинг (ПА), который является крупнейшим по вылову рыбы [1—3]. Его формирование обусловлено холодным меридиональным Перуанским течением, берущим начало из северной ветви Антарктического циркумполярного течения и текущим на север вдоль побережья Южной Америки. В тропиках в зоне пассата под действием ветра сила Кориолиса отклоняет его на запад. В результате область ПА переходит в огромную зону юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО), в которой добывается наибольшее количество ставриды в Мировом океане (4—4,5 млн. т). В течение нескольких десятилетий до 1990 г. Россия вела здесь активный вылов ставриды, который достигал 27 % от её суммарной добычи в ЮВТО [4]. Подъем богатых питательными веществами вод к поверхности океана способствует формированию в областях апвеллинга высокой биологической продуктивности [5, 6], которая обеспечивает устойчивый промысел пелагических видов рыб. В частности, в области ПА, занимающей акваторию около 0,02 % от площади МО, добывается около 20 % мирового улова рыбы [7—11].

К важнейшим абиотическим факторам формирования рыбопродуктивности относятся температура поверхностного слоя океана (ТПО) и интенсивность апвеллинга. Влияние температуры воды на жизнедеятельность морских организмов многогранно [12]. Она может ускорять (замедлять) рост отдельных видов морских организмов и даже приводить к их массовой гибели.

Согласно теории Экмана, апвеллинг в Перуанском течении возникает под действием пассатов, дующих вдоль побережья Южной Америки и вызывающих перенос поверхностных вод с отклонением влево от направления ветра [13, 14]. В результате происходит подъем в эвфотический слой океана промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных веществ. Вследствие этого в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для воспроизводства и развития фито- и зоопланктона, служащего кормовой базой для различных видов пелагических рыб [15—16]. В работе [17] рассмотрены изменения в локализации участков промысла и величине вылова основных промысловых гидробионтов в Перуанском подрайоне в годы с Эль-Ниньо и при его отсутствии. Показана «активная

реакция» промысла на изменяющиеся условия среды в периоды Эль-Ниньо, проявляющаяся в смещении участков промысла на меньшие глубины, особенно в пределах исключительной экономической зоны Перу.

Наиболее важным видом, поддерживающим пищевую цепь в ПА, является анчоус *Engraulis ringens* [18], который, кроме своей пищевой ценности, играет большую роль в экономике Перу и в мировом производстве рыбной муки [19]. В некоторые годы вылов анчоуса достигает 10 % мирового улова [20]. Естественно, это самый важный промысел в Перу и к тому же самая интенсивно эксплуатируемая рыба в мировой истории [21]. Однако причины «перуанской загадки» огромной биологической продуктивности района ПА и значительного объема добычи рыбы в настоящее время еще не до конца выявлены [20].

Цель данной работы состоит в построении статистических моделей вылова анчоуса в области ПА с использованием индексов апвеллинга (ИА), рассчитанных по данным о скорости ветра в приводном слое атмосферы на основе теории Экмана и натурных данных о ТПО, а также в проверке использования этих моделей для прогноза вылова анчоуса на несколько лет.

Исходные данные и методы их обработки

Исходными данными по ТПО послужила база данных GODAS (Global Ocean Data Assimilation System), которая основана на квазиглобальной конфигурации модели GFDL MOM.v3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model). Пространственная область, охватываемая GODAS, простирается от 75° ю.ш. до 65° с.ш. и имеет разрешение 1°×1°, увеличенное до 1/3° в направлении север-юг в пределах 10° от экватора. Зона ПА принята в границах от 4° ю.ш. до 40° ю.ш. [22]. Всего в области ПА было выделено 216 в узлах сетки, для которых из базы данных GODAS выбраны среднемесячные значения ТПО за период 1996—2020 гг.

Для расчета ИА в данной работе использовались зональная и меридиональная компоненты ветра в приводном слое океана в известном архиве реанализа NCEP/DOE AMIP-II (Reanalysis-2) (https://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/ncep2_mon.php) [23], который с 1979 г. является естественным продолжением архива NCEP Reanalysis-1 [24]. В этих архивах используется комбинированный подход к усвоению всех видов исходной информации, но основным из них является спутниковое зондирование. Архив R-2 охватывает период наблюдений с 1979 г. по настоящее время с использованием обновленных моделей прогнозирования и усвоения данных. Пространственная область реализации модели простирается от 88,5° ю.ш. до 88,5° с.ш. и имеет разрешение 1,8° × 1,8° [24]. Для региона ПА в границах от 4° до 40° ю.ш. выделено 73 точки в узлах сетки (рис. 1). Для указанных точек из этого архива отобраны средние месячные значения зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за период с 1996 г. по 2020 г.

Поскольку вертикальные скорости движения вод в океане малы и зачастую определяются с большими ошибками, то определение интенсивности апвеллинга оказывается весьма сложной задачей, поэтому её довольно часто определяют

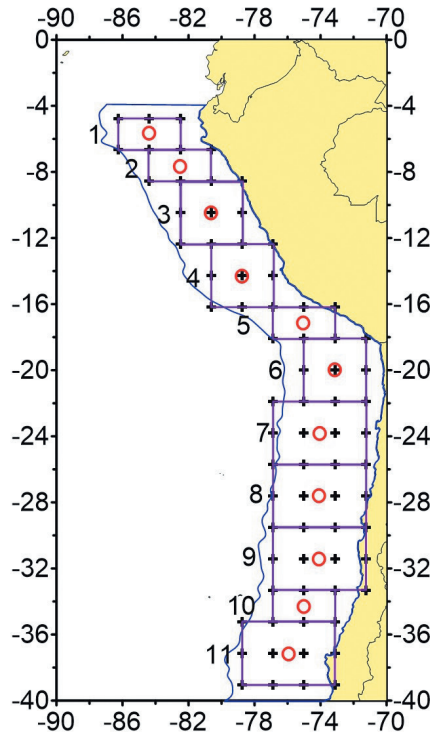


Рис. 1. Схема области Перуанского апвеллинга. Индекс апвеллинга рассчитывался для выделенных прямоугольных районов [29]. Кругами показаны центры районов, в которых значения ТПО использовались в статистических моделях.

Fig. 1. Diagram of the Peruvian upwelling region. The upwelling index were calculated for the selected rectangles [29]. The circles indicate the centers of the regions where SST values were used in the statistical models.

косвенными методами [12]. В связи с этим достаточно широкое распространение получили различные индексы апвеллинга. Так, к числу простейших индексов относится разность температур воды (ΔT_w) между прибрежными и океанскими водами, которая измеряется на одной широте с целью оценки охлаждающего эффекта апвеллинга [25—27]. Однако серьезным недостатком такого подхода является неоднозначность выбора меры расстояния между прибрежными и океаническими водами.

Более обоснованным считается индекс апвеллинга (ИА), предложенный Бакуном в 1973 г. [28], который получил довольно широкое распространение в зарубежных исследованиях. Расчёт этого индекса основан на расчете геострофических компонент ветра в каждой точке расчетной области с использованием среднемесячных градиентов приземного атмосферного давления, которые необходимы для определения оценок экмановского переноса. В этом случае рассчитанный полный

поток водной массы характеризует только дрейфовую составляющую течения и не отражает вертикального поступления воды из глубин океана. Методика оценки интегрального ИА, предложенная в [12], лишена этого недостатка, поскольку использует реальные скорости ветра, вследствие чего возможно определять вертикальный поток массы на уровне глубины трения. Отметим, эта методика применялась в области ПА [29], показала хорошие результаты, поэтому используется в настоящей работе. Исходя из выделенных 73 точек, область ПА предварительно была разбита на 11 прямоугольных районов (рис. 1). Согласно методике [12], ИА рассчитывался как среднее значение для выделенных районов.

В качестве косвенного показателя биомассы анчоуса [30] можно воспользоваться оценками улова на единицу рыболовного усилия *CPUE* (Catch Per Unit Effort). Систематический мониторинг *CPUE* проводился Перуанским морским институтом (IMARPE, Instituto del Mar del Perú на испанском языке) в период с 1996 г. по 2020 г.

Для построения статистических моделей *CPUE* применялись 2 метода многомерного статистического анализа (МСА): множественная линейная регрессия (МЛР) и дерево решений (ДР, decision trees). МЛР — самый популярный метод МСА, имеет множество модификаций и приводится практически во всех пакетах прикладных статистических программ (ППСП). В данной работе использовалась его классическая версия, в которой отбор значимых переменных выполнялся методом включения на основе частной корреляции. Модель считалась оптимальной на k -том шаге, если при включении в модель новой $k+1$ переменной она перестает быть значимой по критерию Фишера или какая-либо переменная в модели становится незначимой по критерию Стьюдента. В качестве порога значимости использовалось условие $\alpha = 0,05$.

Метод ДР является одним из самых популярных методов Data Mining, который определяется как анализ экспериментальных данных с целью нахождения неочевидных, объективных и практически полезных закономерностей. Описание этого метода дается в работах [31—34]. В наиболее простом виде дерево решений — это способ представления классифицирующих правил в виде иерархической структуры. Пока что данный метод не получил заметного распространения в гидрометеорологии, хотя в работах [35, 36, 37] показано, что он имеет преимущество по сравнению с МЛР в точности описания дисперсии предиктанта и построения его модели более лаконичной структуры. Моделирование годовых значений *CPUE* проводилось в пакете Statistica с использованием алгоритма CART [38].

Результаты расчётов и их обсуждение

Статистическая модель CPUE методом МЛР. Исходными данными послужили 11 переменных ТПО (T_i) в центрах выделенных районов и столько же значений ИА (U_i), характеризующих их средние оценки для этих районов. В результате расчётов получена оптимальная стандартизированная (в безразмерном виде) модель МЛР, включающая пять переменных:

$$CPUE = 0,910 U_9 - 0,628 U_3 - 0,478 T_3 + 0,550 T_{11} - 0,376 T_8. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации этого уравнения равен $R^2 = 0,88$, а относительная ошибка (δ) в долях СКО $CPUE$ равна 0,34. Последовательность вхождения предикторов в уравнение (1) представлена в табл. 1. Нетрудно видеть, что наиболее важным предиктором является ИА в районе 9 (U_9), т. е. в чилийской зоне ПА, который описывает больше половины (53 %) дисперсии $CPUE$. Это означает, что океанографические условия в Чилийской зоне оказывают важное влияние на формирование $CPUE$ анчоуса. Следующий по значимости ИА в районе 3 (U_3), который находится в прибрежной зоне Перу. Далее в модель входит ТПО в перуанской и чилийской зонах ПА (T_3 , T_{11} , T_8).

Таблица 1

Статистические оценки моделей МЛР для $CPUE$
по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана

Statistical estimates of MLR Models for $CPUE$
from upwelling index and sea surface temperature Data

Шаг модели	Предиктор, входящий в модель	Период 1996—2020 гг.		Период 1996—2016 гг.	
		R^2	δ	R^2	δ
1	U_9	0,53	0,67	0,53	0,67
2	U_3	0,68	0,55	0,68	0,55
3	T_3	0,77	0,47	0,77	0,47
4	T_{11}	0,84	0,40	0,84	0,40
5	T_8	0,88	0,34	0,88	0,34

Для оценки прогностических возможностей уравнения (1) исходная выборка была разделена на зависимую (1996—2016 гг.) и независимую (2017—2020 гг.). Для зависимой выборки был выполнен расчет статистической модели $CPUE$. Результаты показали, что она совпадает с основной моделью (табл. 1). Это означает почти полное совпадение коэффициентов регрессии, их высокую устойчивость во времени. Отсюда следует, что опытный прогноз $CPUE$ за 2017—2020 гг. также должен быть очень близок к его фактическим значениям. Действительно, как видно из рис. 2, фактические и прогностические значения $CPUE$ имеют минимальные различия.

Статистическая модель $CPUE$ методом дерева решений. Исходными данными для построения модели послужили рассмотренные выше значения индекса апвеллинга и ТПО за период с 1996 г. по 2020 г. На рис. 3 представлены результаты измерения стоимости ошибок перекрестной проверки на независимой выборке (CV-cost) и стоимости тестирования на обучающем наборе (Resubstitution cost) в зависимости от количества узлов дерева (числа ветвлений). Оценка стоимости обучения (Resubstitution cost) зависит от толщины дерева. Чем оно толще, тем оно точнее будет описывать зависимую переменную, поэтому в общем случае эта оценка обратно пропорциональна коэффициенту детерминации, полученному из обучающейся выборки. Распределение ошибок кроссвалидации (CV-cost) показывает, что дерево номер 5 имеет наименьшую ошибку независимых оценок, поэтому его можно считать оптимальным. Для рассмотренной модели ДР рассчитаны

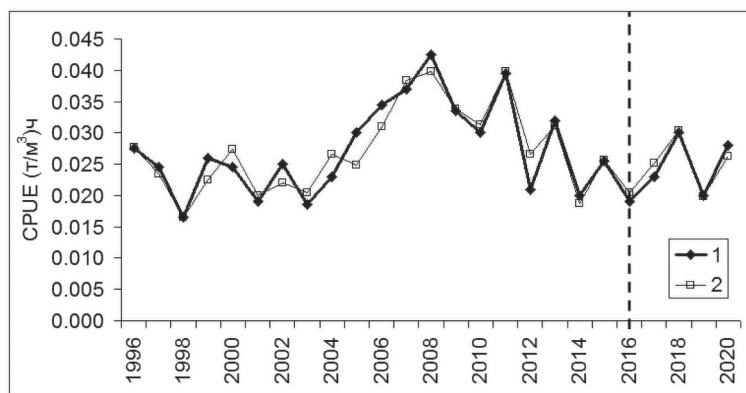


Рис. 2. Межгодовая изменчивость фактических (1) и вычисленных по модели МЛР (2) значений $CPUE$. Прогностические оценки $CPUE$ рассчитаны для периода 2017—2020 гг.

Fig. 2. Interannual variability of actual (1) and MLR model-calculated (2) $CPUE$ values. $CPUE$ forecast estimates are calculated for the period 2017—2020.

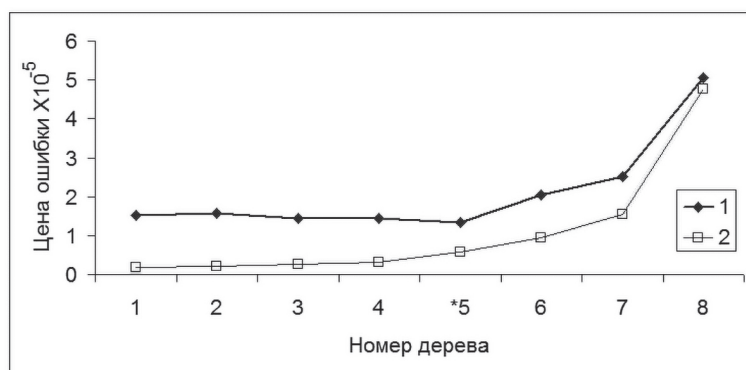


Рис. 3. Распределение значений цены ошибки кросс-проверки (CV-cost) (1) и цены проверки на обучающей (зависимой) выборке (Resubstitution cost) (2) в зависимости от числа узлов дерева для модели $CPUE$ за период с 1996 г. по 2020 г.

Fig. 3. Distribution of the values of the cross-validation error cost (CV-cost) (1) and the cost of validation on the training (dependent) sample (Resubstitution cost) (2) depending on the number of tree nodes for the $CPUE$ model for the period 1996—2020.

статистические характеристики: коэффициент детерминации и относительная ошибка за период с 1996 г. по 2020 г., оценки которых представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, уже при трех ветвлениях точность модели ДР совпадает с моделью МЛР, а для пяти ветвлений ($R^2 = 0,94$, $\delta = 0,23$) она заметно точнее ее. Уже на первом ветвлении индекс U_9 описывает 67 % дисперсии $CPUE$, а с учётом третьего ветвления — 75 % дисперсии. Дело в том, что он входит в модель

дважды (на 1 и 3 ветвлениях). В этом особенность моделей ДР, которые допускают использование исходных переменных неограниченное число раз и при этом они строят непараметрические модели, т. е. исходные данные свободны от теоретического распределения.

Таблица 2

Статистические оценки моделей дерева решений для *CPUE*
по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана
Statistical evaluations of decision tree models for *CPUE* using upwelling index
and sea surface temperature data

Число ветвлений	Предиктор, входящий в модель	Период 1996—2020 гг.		Период 1996—2016 гг.	
		R^2	δ	R^2	δ
1	U_9	0,67	0,56	0,71	0,53
2	T_1	0,80	0,44	0,80	0,44
3	U_9	0,88	0,34	0,88	0,34
4	U_{10}	0,93	0,25	0,94	0,24
5	U_7	0,94	0,23	0,95	0,21

Далее по аналогии с моделью МЛР для зависимой выборки (1996—2016 гг.) строилась модель ДР, статистические характеристики которой также приводятся в табл. 2. Как и в случае с моделью МЛР, мы видим почти полное соответствие рассчитанных характеристик. Учитывая скорость нарастания коэффициента детерминации, можно ограничиться третьим ветвлением, при котором $R^2 = 0,88$, т. е. модель ДР соответствует модели МЛР на пятом шаге. Несмотря на это следует отметить принципиальное отличие моделей между собой. Оно состоит в том, что совпадает только первый предиктор U_9 . На других шагах (ветвлениях) они отличаются друг от друга.

На рис. 4 приводится модель ДР для трех ветвлений. Дерево 3 имеет достаточно простой вид. На первом ветвлении разделителем является ИА в районе 9 (рис. 1). Если он меньше 622,46 мм/мес, то в 14 случаях из 21 отмечались низкие значения *CPUE* со средним значением 0,0231 (т/м³)ч. Если ИА больше 622,46 мм/мес, то, наоборот, в 7 случаях *CPUE* становится высоким (в среднем 0,0356 (т/м³)ч). На втором ветвлении уточняется формирование 14 значений низких оценок *CPUE* под влиянием ТПО в районе 1. Если T_1 становится ниже $< 21,6$ °С, то отмечается 4 оценки *CPUE* около нормы, если больше $> 21,6$ °С, то 10 аномально низких оценок *CPUE*. На третьем ветвлении разделителем является опять индекс U_9 . При аномально высоких значениях $U_9 > 667,7$ мм/мес имеем три аномально высоких оценки *CPUE*. Если U_9 находится в диапазоне от 667,7 до 662,4 мм/мес., то определяются 4 оценки *CPUE* чуть выше нормы. Очевидно, что ИА в районе 9 можно считать наиболее важным фактором для оценки *CPUE* анчоуса в пределах перуанского шельфа, поскольку он одновременно является первым предиктором в модели МЛР.

На рис. 5 представлено сопоставление вычисленных по модели ДР и фактических значений *CPUE*. Нетрудно видеть их хорошее соответствие, в том числе и

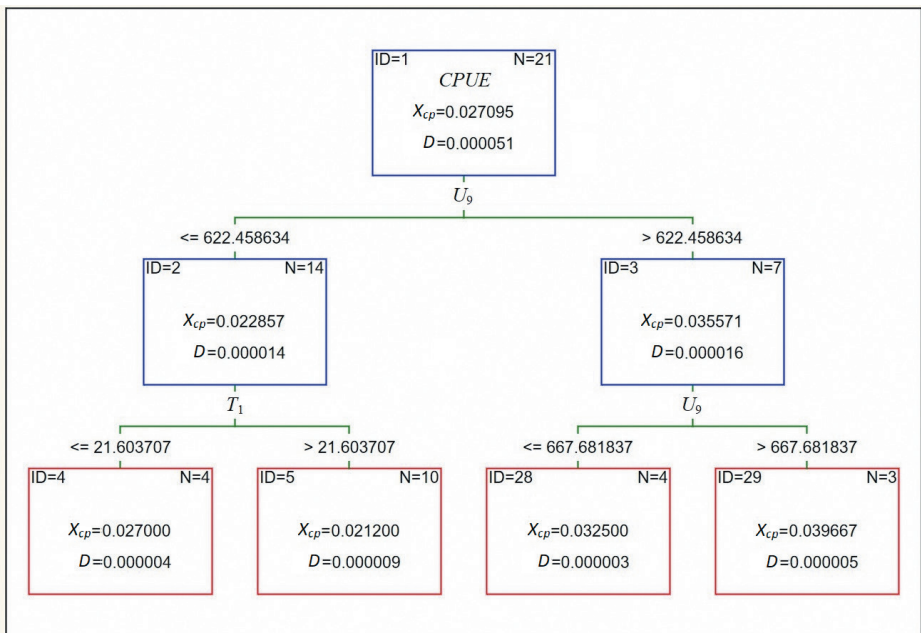


Рис. 4. Модель дерева решений, состоящего из трех ветвлений, описывающих 88 % дисперсии годовых значений $CPUE$ (X_{cp} — среднее значение, D — дисперсия).

Fig. 4. The decision tree model, consisting of three branches, describing 88% of the variance in annual $CPUE$ values (average X_{cp} , variance D).

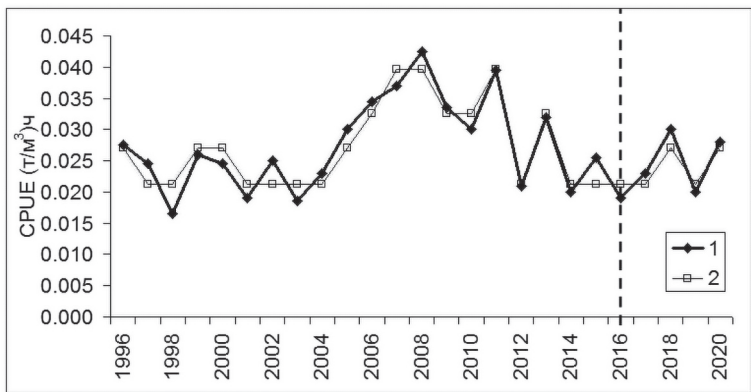


Рис. 5. Межгодовая изменчивость фактических (1) и вычисленных по модели ДР (2) значений $CPUE$. Прогностические оценки $CPUE$ рассчитаны за период с 2017 г. по 2020 г.

Fig. 5. Interannual variability of actual (1) and calculated (2) $CPUE$ values by the DT model. $CPUE$ forecast estimates are calculated for the period 2017—2020.

прогностических оценок *CPUE*. Можно также отметить разные способы подбора вычисленных оценок *CPUE* по моделям ДР и МЛР к фактическим значениям. В первом случае используется принцип нахождения минимального геометрического расстояния, во втором — принцип сравнения по изменчивости, т. е. выбирается такая переменная, которая дает максимальный вклад в описание дисперсии исходного ряда. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, который описывает более половины дисперсии *CPUE* методом МЛР и более двух третей методом ДР. Однако причины столь высокой корреляционной связи U_9 с *CPUE* не совсем понятны. Возможно, она обусловлена наличием между подрайонами 1-5 (Перу) и 9 (Чили) (см. рис. 1) так называемой дальней связи — тесной зависимости параметров среды и промысла, обусловленной единым регулирующим механизмом — переносом теплозапаса и вихревой динамики вод в северном направлении в пределах Перуанского течения ЮВТО. Этот вопрос выходит за рамки данной работы и требует дополнительного исследования.

Закключение

В данной работе впервые рассматривается построение статистических моделей биомассы анчоуса в области Перуанского апвеллинга за период с 1996 г. по 2020 г. на основе данных о температуре поверхностного слоя океана и рассчитанным значениям индекса апвеллинга, который определялся по скорости ветра в приводном слое атмосферы на основе теории Экмана. Индексом биомассы анчоуса послужил улов на единицу рыболовного усилия *CPUE* (Catch Per Unit Effort). Хотя данный индекс является косвенным, он довольно хорошо отражает численность биомассы анчоуса. Область ПА принималась от 4° ю.ш. до 40° ю.ш. и была разбита на 11 прямоугольных районов. Для каждого района вычислялись среднегодовые значения индекса апвеллинга (U_i) и значения ТПО (T_i). Таким образом, исходная выборка включала 22 переменных.

При построении статистических моделей использовались два метода многомерного статистического анализа: множественная линейная регрессия (МЛР) и дерево решений (ДР, decision trees). Оптимальная модель *CPUE* методом МЛР включает пять переменных, первой из них является U_9 , которая описывает 53 % дисперсии *CPUE*. На пятом шаге переменные описывают 88 % дисперсии *CPUE*. Показано, что при уменьшении объема выборки на четыре года сохраняется высокая устойчивость коэффициентов регрессии во времени. Это позволило выполнить опытный прогноз *CPUE* на 2017—2020 гг., согласно которому между фактическими и прогностическими значениями *CPUE* отмечаются минимальные расхождения.

Модель ДР имеет более высокую скорость роста коэффициента детерминации и снижения стандартной ошибки модели. Уже на третьем ветвлении ее точность достигает точности модели МЛР на пятом шаге. На первом ветвлении индекс U_9 описывает 67 % дисперсии *CPUE*, причем он входит в модель дважды (на 1 и 3 ветвлениях), вследствие чего его вклад повышается до 75 %. Визуализация модели

ДР позволила наглядно показать, как происходит отбор оценок *CPUE* в зависимости от реперных значений переменных U_9 и T_1 на 3 ветвлении. Опытный прогноз *CPUE* на 2017—2020 гг. также подтвердил полное соответствие фактических и прогностических значений *CPUE*.

Сравнение методов МЛР и ДР показало, что последний имеет некоторые преимущества в точности описания *CPUE*, в визуализации получаемых результатов и более понятной их интерпретации. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, который описывает более половины дисперсии *CPUE* методом МЛР и три четверти методом ДР.

Список литературы

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? // *Progress in Oceanography*. 2008. Vol. 79, P. 290—299. DOI: 10.1016/j.pcean.2008.10.027.
2. Heileman, S., Guevara R., Chavez F. et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas / «XVII-56 Humboldt current: LME # 13.» in *The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME)*, eds K. Sherman and G. Hempel (Nairobi: United Nations Environment Programme). 2009. 15 p.
3. Gutierrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change // *Environmental Development*. 2016. Vol. 17, P. 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: РГГМУ, 2009. 278 с.
5. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973 // *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr.* 1974. Vol. 12. No. 3. P. 187—201.
6. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa / *Rapports et Proces-verbaux des Réunions. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982. Vol. 180. P. 148—183.
7. Bakun A., Field D., Redondo-Rodriguez A. et al. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
8. Bakun A., Black B., Bograd S. et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems // *Current Climate Change Reports*. 2015. Vol. 1. P. 85—93. doi: 10.1007/s40641-015-0008-4.
9. Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F. et al. Impacts of El Nino events on the Peruvian upwelling system productivity // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5423—5444. doi:10.1002/2016JC012439.
10. Castillo R., Dalla L., García W. et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017 // *Fisheries Oceanography* 2019. Vol. 28. P. 389—401. doi:10.1111/fog.12419.
11. FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation / FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022. 266 p. ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate.
12. Малинин В. Н., Чернышков П. П., Гордеева С. М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб: Гидрометеиздат. 2002. 156 с.
13. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009. P. 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
14. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V. et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, 4800. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
15. Духова Л. А., Сапожников В. В. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // *Труды ВНИРО*. 2014. Том 152. С. 85—100.

16. Сапожников В. В., Чернышков П. П., Шнар В. Н. и др. Комплексные исследования пелагической экосистемы района Канарского апвеллинга на СТМ «Атлантида» в июле-августе 2006 г. // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 473—476.
17. Красноторыдько О. Ю. О повторяемости очень сильных и катастрофических Эль-Ниньо и их влиянии на промысел в Перуанском подрайоне Юго-Восточной Пацифики // Труды АтлантНИ-РО. 2018. Том 2. № 2. Калининград: АтлантНИРО. С. 66—83.
18. Espinoza P., Bertrand A. Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt Current System // Progress in Oceanography. 2008. Vol. 79. P. 215—227.
19. Bakun A., Broad K. Climate and fisheries: Interacting paradigms, scales, and policy approaches. The IRI-IPRC Pacific Climate-Fisheries Workshop, Honolulu, 14—17 November. 2002.
20. Massing J. C., Schukat A., Auel H. et al. Toward a Solution of the «Peruvian Puzzle»: Pelagic Food-Web Structure and Trophic Interactions in the Northern Humboldt Current Upwelling System Off Peru // Front. Mar. Sci. 2022. Vol. 8. P. 759—603.
21. Di Dario F., Hüne M., Pérez-Matus A., Vega R. *Engraulis ringens*. The IUCN Red List of Threatened Species. 2021. e.T183775A102904317. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T183775A102904317.en>. Accessed on 26 September 2024.
22. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America // Ecological Studies. 2001. Vol. 144. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. American Meteorological Society. 2002. Vol. 83. No. 11. P. 1631—1644. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
24. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. March 1996. Vol. 77. P. 437—472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
25. Wooster W.S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic // Journal of Marine Research. 1976. Vol. 34. No. 2. P. 131—141.
26. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991 // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99. C7. P. 14197—14207.
27. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to *Octopus vulgaris* recruitment // Oceanologica Acta. 2000. Vol. 23. N. 4. P. 391—408. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)01113-0](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01113-0).
28. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Technical Report NMFS SSRF-671. 1973. 103 p.
29. Матина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения // Гидрометеорология и экология, 2024. №75. С. 280—292.
30. Skalski J., Elaine K. Millsaugh J. “Analysis of population indices” in Wildlife Demography: Analysis of Sex, Age, and Count Data. Academic Press. 2005. P. 359—434.
31. Bramer M. Principles of Data Mining. Springer: 2007. 344 p.
32. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, CA: 1984. 358 p.
33. Classification and Regression Trees: textbook. Electronic resource. URL: <http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350/lectures/22/lecture-22.pdf> (free, 20.01.2018).
34. Popular Decision Tree: Classification and Regression Trees (C&RT). Electronic resource. URL: <http://documents.software.dell.com/Statistics/Textbook/Classification-and-Regression-Trees> (free, 20.01.2018).
35. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования // Ученые записки РГМУ. 2016. № 44. С. 30—44.
36. Гордеева С. М., Малинин В. Н. О предвычислении годового стока крупных рек европейской части России на основе метода деревьев решений (Decision Trees) // Гидрометеорология и экология. 2018. №50. С. 53—65. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292.
37. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Влияние влагообмена в Северной Атлантике на увлажнение Европейской части России и годовой сток Волги // Водные ресурсы, 2019, том 46, № 3, С. 318—332. DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332.

38. Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help. Electronic resource. URL: [http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/ Interactive Trees CRTCHAID_HIndex](http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/Interactive%20Trees%20C&RT%20CHAID_HIndex) (free, 20.01.2018).

References

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography*. 2008; (79): 290—299. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.027.
2. Heileman S., Guevara R., Chavez F. et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas. "XVII-56 Humboldt current: LME # 13," in The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME) (eds K. Sherman and G. Hempel). Nairobi: United Nations Environment Programme. 2009. 15 p.
3. Gutierrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change. *Environmental Development*. 2016; (17): 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoj chasti Tikhogo okeana. T. 1. Izmenchivost' faktorov sredi obitaniya = Fishery oceanology of south-east Pacific Ocean. Volume 1. Variability of environmental factors*. St. Petersburg: RSHU, 2009: 278 p. (In Russ.).
5. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973. *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr.* 1974; 12(3): 187—201.
6. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa. *Rapports et Proces-verbaux des Réunion. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982; (180): 148—183.
7. Bakun A., Field D., Redondo-Rodriguez A. et al. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*. 2010; (16): 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
8. Bakun A., Black B., Bograd S. et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*. 2015; (1): 85—93. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4.
9. Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F. et al. Impacts of El Nino events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017; (122): 5423—5444. DOI: 10.1002/2016JC012439.
10. Castillo R., Dalla L., García W. et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fisheries Oceanography*. 2019, (28): 389—401. DOI: 10.1111/fog.12419.
11. FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation. FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022: 266 p. ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate.
12. Malinin V. N., Chernyshkov P. P., Gordeeva S. M. *Kanarskiy apvelling: krupnomasshtabnaya izmenchivost' i prognoz temperatury vody = The Canarian upwelling: a Large-scale variability and forecast of water temperature*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 2002: 156 p. (In Russ.).
13. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009; 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
14. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V. et. al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System. *Scientific Reports*. 2022; (12), 4800. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
15. Dukhova L.A., Sapozhnikov V.V. Hydrochemical indicators of primary production in the zones of the Peruvian and Canary upwellings. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2014; (152): (85—100). (In Russ.).
16. Sapozhnikov V.V., Chernyshkov P.P., Schnar V.N. et. al. Comprehensive studies of the pelagic ecosystem of the Canary upwelling region on the Atlantis STM in July-August 2006. *Okeanologiya = Oceanology*. 2007; 47(3): (473—476). (In Russ.).
17. Krasnoborodko, O. On the frequency of very strong and catastrophic El Niño and their impact on fisheries in the Peruvian subarea of the Southeast Pacific. *Trudy AtlantNIRO=Proceedings of AtlantNIRO*. 2018; (2)2. Kaliningrad: AtlantNIRO: (66—83). (In Russ.).

18. Espinoza P., Bertrand A. Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt Current System. *Progress in Oceanography*. 2008; (79): 215—227. DOI: 10.1016/j.pcean.2008.10.022.
19. Bakun A., Broad K. Climate and fisheries: Interacting paradigms, scales, and policy approaches. The IRI-IPRC Pacific Climate-Fisheries Workshop, Honolulu, 14–17 November. 2002.
20. Massing J. C., Schukat A., Auel H. et al. Toward a Solution of the «Peruvian Puzzle»: Pelagic Food-Web Structure and Trophic Interactions in the Northern Humboldt Current Upwelling System Off Peru. *Frontiers in Marine Science*. 2022;(8):(759603). DOI: 10.3389/fmars.2021.759603ю
21. Di Dario F., Hüne M., Pérez-Matus A., Vega R. *Engraulis ringens*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T183775A102904317. DOI: 10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T183775A102904317.en. Accessed on 26 September 2024.
22. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America. *Ecological Studies*. 2001; (144): 229—244. *Springer, Berlin, Heidelberg*. DOI: 10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; 83(11): 1631—1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
24. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al., The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996; (77): 437—472. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
25. Wooster W.S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*. 1976; 34(2): 131—141.
26. Nykjer L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*. 1994; 99(C7): 14197—14207.
27. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment. *Oceanologica Acta*. 2000; 23(4): 391—408. DOI: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0.
28. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Tech. Rep., NMFS SSRF-671. 1973: 103 p.
29. Martina-Vasquez J., Gordeeva S. M., Malinin V. N. Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (75): (280—292). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292. (In Russ.).
30. Skalski J., Elaine K. Millspaugh J. “Analysis of population indices” in Wildlife Demography: Analysis of Sex, Age, and Count Data. Academic Press. 2005: 359—434.
31. Bramer M. Principles of Data Mining. Springer, 2007: 344 p.
32. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, CA, 1984: 358 p.
33. Classification and Regression Trees: textbook. Electronic resource. URL: <http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350/lectures/22/lecture-22.pdf> (free, 20.01.2018).
34. Popular Decision Tree: Classification and Regression Trees (C&RT). Electronic resource. URL: <http://documents.software.dell.com/Statistics/Textbook/Classification-and-Regression-Trees> (free, 20.01.2018).
35. Gordeeva S. M., Malinin V. N. Using Data Mining in the Problem of Hydrometeorological Forecasting. *Uchonye zapiskii RSHU = Scientific notes RSHU*. St. Petersburg: RSHU. 2016; (44): (30—44). (In Russ.).
36. Gordeeva S. M., Malinin V. N. On predicting annual runoff of large rivers of European Russia based on Decision Trees method. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2018; (50): (53—65). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292. (In Russ.).
37. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Effect of Moisture Exchange in the Northern Atlantic on European Russia Moistening and Annual Volga Runoff. *Vodnyye resursy = Water resources*. 2019; 46(3): (318—332). DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332. (In Russ.).
38. Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help. Electronic resource. URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/InteractiveTreesCRTCHAID_HIndex (free, 20.01.2018)

Информация об авторах

Мартина-Васкес Джимми Хуан, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, jimmymartinavasquez@gmail.com.

Гордеева Светлана Михайловна, кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Российского государственного гидрометеорологического университета, gordeeva@rshu.ru.

Малинин Валерий Николаевич, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Information about authors

Martina Vásquez Jimmy Juan, PhD student of the Russian State Hydrometeorological University.

Gordeeva Svetlana Mikhailovna, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Russian State Hydrometeorological University.

Malinin Valery Nikolaevich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management of the Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 18.10.2024

Принята к печати 02.12.2024

The article was received on 18.10.2024

The article was accepted on 02.12.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 689—715.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):689—715.

МЕТЕОРОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

Научная статья

УДК 551.524(7)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-689-715

О 18,6-летних колебаниях температуры воздуха в западной части Северной Америки

Владимир Анатольевич Молодых

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург,
vam3@rambler.ru

Аннотация. Анализ многолетних изменений зимних аномалий температуры воздуха в западной части Северной Америки позволил выявить географический регион, в котором выделяются их 18,6-летние колебания. Границы региона простираются от западного побережья до 15° к востоку от него. Амплитуда колебаний температуры воздуха в 18,6-летнем цикле меняется от 0,3 до 2,0 °С в зависимости от широты и географического положения. Рассмотрены возможные причины отмеченных колебаний температуры воздуха, связанные с циркуляцией атмосферы над Тихим океаном и колебаниями температуры его поверхности, модулируемой лунным деклинационным приливом. Сделан вывод о многофакторности влияния лунного деклинационного прилива на температуру воздуха.

Ключевые слова: изменчивость температуры воздуха, атмосферная циркуляция, лунный деклинационный прилив, 18,6-летний цикл.

Благодарности: Шерстюков Б. Г., Логинов В. Ф., Сидоренков Н. С., Войнов Г. Н.

Для цитирования: Молодых В. А. О 18,6-летних колебаниях температуры воздуха в западной части Северной Америки // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 689—715. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-689-715.

METEOROLOGY. DISCUSSION

Original article

On 18.6-year air temperature oscillations in the western part of North America

Vladimir A. Molodykh

A. I. Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia

Summary. An analysis of long-term variations in winter air temperature anomalies in western North America has revealed a geographic region, where 18.6-year oscillations stand out. The region's boundaries

extend from the west coast to 15° east of it, in latitude from 30° to 60° N, with typical dimensions of 1,000 to 2,500 km. The amplitude of air temperature oscillations in the 18.6-year cycle varies from 0.3 to 2.0 °C, depending on latitude and geographic location. The 18.6-year oscillations occur only in winter. The proximity of the region to the Pacific Ocean suggests its influence on air temperature variations. A comparison of possible factors in the formation of 18.6-year air temperature oscillations has led to the conclusion that both atmospheric and oceanic characteristics, which are affected by the lunar declination tide, have a common influence. The question of the manifestation of 18.6-year fluctuations in air temperature anomalies in the studied area only in the winter season can be explained by the minimal influence of radiation factors in its annual course on the temperature regime. The allocation of an area with different statistical properties in the southeast of the studied region than for its main part once again emphasizes the limited zone of influence of the lunar declination tide on temperature. Scientific works are analyzed in which a similar theory is considered and confirmed by practical conclusions, but in which there is no detailed analysis of air temperature fluctuations made in this work. Further attention needs to be paid to patterns of quasi-twenty-year changes in ocean surface temperatures at significant distances from the North American coast.

Keywords: air temperature oscillations, atmospheric circulation, lunar declination tide, 18.6-year cycle.

Acknowledgments: Sherstyukov B. G., Loginov V. F., Sidorenkov N. S., Voynov G. N.

For citation: Molodykh V. A. On 18.6-year air temperature oscillations in the western part of North America. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):689—715. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-689-715.

Введение

На территории Северной Америки рядом авторов были выявлены колебания температуры воздуха T_a с периодом около 18,6 года. Так, Р. Карри методом спектрального анализа установил наличие двух пиков спектра, один из которых имел период 18,8 года [1]. Автор идентифицировал его как лунный 18,6-летний прилив, отметив, что амплитуда и фаза сильно нестационарны как во времени, так и в пространстве. В работе [2] Р. Карри привел доказательства 18,6-летнего лунного узлового периода в T_a на 30 станциях на востоке Северной Америки. Также им был обнаружен кластер из 9 станций в западной Канаде, демонстрирующий 18,6-летнюю периодичность, которую автор связывает с усилением засухи на западе Соединенных Штатов.

В работе Дж. Гио [3] проведен анализ реконструированных рядов T_a и представлены доказательства суперпозиции двух температурных волн, возникающих в результате 22-летних солнечных и 18,6-летних лунных узловых приливных циклов T_a в Центральной Канаде. Имеется исследование С. Маккиннелла и В. Крауфорда [4], в котором рассмотрены изменения T_a и температуры поверхности океана T_w в зимний период (январь), и было показано наличие в них 18,6-летнего периода на побережье провинции Британская Колумбия в Канаде (севернее 48° с.ш.). В работе Т. Ройера [5] прослеживается связь между T_w и T_a в районе г. Ситка, Аляска (около 57° с.ш.), и в них проявляется 18,6-летний сигнал.

Проявления 18,6-летнего приливного цикла Луны в различных характеристиках атмосферы и океана рассматривались довольно часто. Большое внимание к изучению характеристик лунного деклинационного прилива в океане уделил И. В. Максимов [6]. Помимо изучения характеристик прилива в различных точках океана, он показал, что астрономические течения сопровождаются колебаниями T_w , что может приводить к колебаниям давления и T_a . В работах Э. И. Саруханяна и Н. П. Смирнова с соавторами [7, 8] проанализировано влияние

многолетнего лунного прилива на характеристики циклонических центров действия атмосферы в Северном и Южном полушариях и различные индексы атмосферной циркуляции. Авторами сделан вывод о заметной роли многолетнего лунного прилива в формировании долгопериодной изменчивости циркуляции атмосферы. В монографии В. Ф. Логинова [9] оценена роль приливообразующей силы квазидевятнадцатилетнего лунного деклинационного прилива в изменении климата. Выявленные в работе Л. В. Зотова с соавторами [10] квазидвадцатилетние колебания глобальной T_a , авторы связывают с 18,6-летним лунным приливом, описывая его как возможный климатообразующий фактор. В работе И. Ясуда [11] установлена связь между временем возникновения явлений Эль-Ниньо / Южное колебание и 18,6-летним периодом лунного приливного цикла во временных рядах за декабрь — февраль в течение 1867—2015 гг. и ранее с использованием прокси-данных.

В статье Д. О'Брайана и Р. Карри [12] исследовались изменения атмосферного давления в различных регионах Земли и было установлено наличие колебаний с периодом 18,6 года и амплитудой до 0,9 мб. В статье Х. Индестада [13] методом вейвлет-анализа выявлены 18,6-летние лунные колебания глобальной T_a над сушей и T_w . В статье К. А. Рогачева и Н. В. Шлык [14] рассматриваются вариации солености промежуточных вод Ойясио и их связь с лунным нодальным циклом.

Дж. Лодер и С. Гаррет [15] полагают, что доказательства 18,6-летнего цикла T_w в некоторых районах, совпадение их фазы с фазой узлового цикла и твердые физические основания для ожидания уменьшения ТПО в периоды усиления приливных течений требуют серьезного внимания к этой проблеме. Р. Червени и Дж. Шаффер [16] отмечают, что региональный климат по всему миру отображает циклы, соответствующие периодичности максимального лунного склонения (МЛС) в 18,61 года. Авторы предполагают, что тихоокеанский антициклонический круговорот усиливается приливными силами при высоких значениях МЛС, вызывая адвекцию холодной воды в экваториальную область.

Приведенный краткий обзор публикаций показывает интерес не только к проявлениям лунного 18,6-летнего прилива в атмосфере и в океане, но и к возможным механизмам влияния на них. Наиболее часто в качестве региона исследований рассматривалась территория Северной Америки, однако опубликованные результаты пока носят фрагментарный характер.

Проведенный в данном исследовании предварительный анализ территории Северной Америки на предмет выявления колебаний T_a с периодом 18,6 года позволил установить регион вблизи западного побережья США и Канады в зимний период, где такие колебания проявляются отчетливо. Восточнее этого региона, в центре североамериканского континента и в средних широтах его восточного побережья, отмечались квазидвадцатилетние колебания, но их период был больше, 20—22 года.

Анализ и обзор изменений индексов атмосферной циркуляции в тихоокеанском регионе с квазидвадцатилетним периодом проведен, например, в работе [17], однако авторы ограничились общим выводом о наличии у них 19-летнего цикла, без детализации по месяцам. С учетом дискуссионного характера взглядов разных

исследователей на природу этого цикла, возникает необходимость его более тщательного изучения. Исходя из этого, цель настоящего исследования состоит в детальном анализе межгодовых колебаний температуры воздуха T_a в западной части Северной Америки в зимний период, определение их особенностей и выявление возможных причин возникновения.

Исходные данные

Исходными данными в работе являлись аномалии средней месячной T_a над сушей за каждый месяц года, осредненные по 5-градусным условным «квадратам» географической сетки (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) [18]. Данный массив исходных данных охватывает период с 1850 по 2019 гг. и поверхность земного шара при условии, что внутри квадрата сетки имелись наблюдения за T_a хотя бы на одной станции. Вследствие этого возникает определенная неоднородность временных рядов, так как в XX веке число станций в этих «квадратах» быстро росло. Ниже будет показано влияние возможной неоднородности временных рядов на результаты расчетов. Кроме того, в работе использовался архив данных о температуре поверхности океана ersst v.5 Национального центра информации об окружающей среде Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NCEP NOAA США, <https://www.ncei.noaa.gov/products/extended-reconstructed-sst>).

Для анализа были выбраны 30 квадратов координатной сетки на западном побережье Северной Америки. Схема расположения квадратов приведена на рис. 1, а их характеристики — в табл. 1. Выбранная территория охватывает широтную зону от 20° до 60° с.ш. и распределена по долготе от 95° до 135° з.д. Продолжительность выбранных для анализа рядов составляла от 99 лет до 168 лет, в среднем — 136 лет. В перечень квадратов был добавлен квадрат № 4 с длиной ряда 93 года, отмеченный в таблице буквами «м.д.» (мало данных), который позволил уточнить получаемые результаты на северо-восточной границе изучаемого региона.

Таблица 1

Характеристики анализируемых квадратов координатной сетки
Characteristics of the analyzed squares of the coordinate grid

Номер квадрата	Координаты центров квадратов с.ш., з.д.		Анализируемый период, годы		Длина ряда, лет
1	57,5	137,5	1900	2019	120
2	57,5	132,5	1899	2019	121
3	57,5	127,5	1911	2019	109
4	57,5	127,5	1927	2019	93 (м.д.)
5	52,5	132,5	1909	2019	111
6	52,5	127,5	1896	2019	124
7	52,5	122,5	1889	2019	131
8	52,5	117,5	1889	2019	131

Окончание табл. 1

Номер квадрата	Координаты центров квадратов с.ш., з.д.		Анализируемый период, годы		Длина ряда, лет
9	52,5	112,5	1881	2019	139
10	47,5	122,5	1873	2019	147
11	47,5	117,5	1872	2019	148
12	47,5	112,5	1888	2019	132
13	47,5	107,5	1878	2019	142
14	42,5	122,5	1878	2019	142
15	42,5	117,5	1865	2019	155
16	42,5	112,5	1871	2019	149
17	42,5	107,5	1890	2019	130
18	42,5	102,5	1869	2019	151
19	37,5	122,5	1872	2019	148
20	37,5	117,5	1888	2019	132
21	37,5	112,5	1889	2019	131
22	37,5	107,5	1853	2019	167
23	37,5	102,5	1867	2019	153
24	32,5	117,5	1852	2019	168
25	32,5	112,5	1892	2019	128
26	32,5	107,5	1872	2019	148
27	32,5	102,5	1870	2019	150
28	27,5	102,5	1905	2019	115
29	27,5	97,5	1886	2019	134
30	22,5	102,5	1921	2019	99

Методика анализа данных

Для выделения квазидвадцатилетних колебаний во временных рядах T_a последовательно использовались три достаточно простые процедуры статистического анализа:

1) Удаление во временных рядах методом полиномиальной аппроксимации второй степени трендовой составляющей, которая дает значительный вклад в дисперсию исходных рядов и может достигать 2 °C и более за рассматриваемый промежуток времени.

2) Цифровая фильтрация рядов зимних и месячных аномалий T_a по квадратам сетки фильтром с передаточной функцией, изображенной на рис. 2. Для фильтрации применялся нерекурсивный цифровой фильтр с окном Ханна [19]. При этом подавлялись колебания с периодами менее 13 лет. Число весовых коэффициентов фильтра было выбрано равным 21, а частота обрезания фильтра задавалась равной 0,075, что соответствует периоду 13,3 года.

3) Расчет и анализ автокорреляционных функций (АФ), полученных после фильтрации рядов аномалий T_a . Максимальный сдвиг АФ выбирался равным 74 годам для рядов длиной более 120 лет. Вид и свойства АФ для разных квадратов

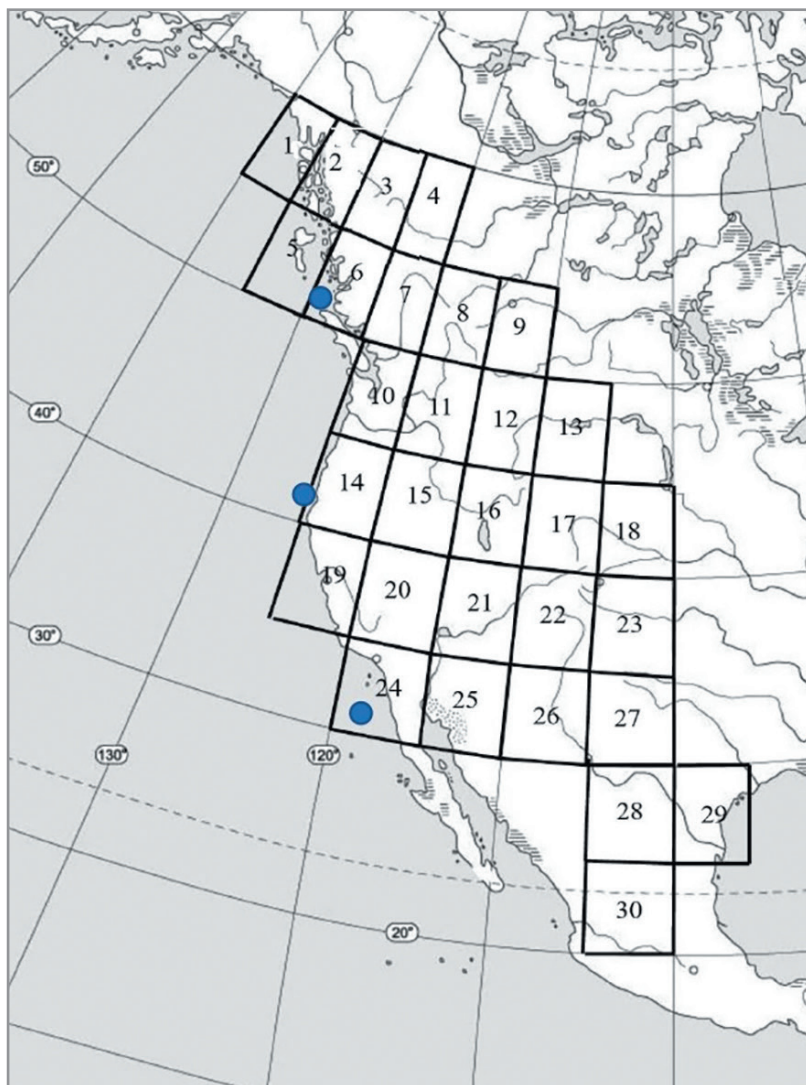


Рис. 1. Расположение пятиградусных «квадратов» сетки, использованных при анализе температуры воздуха. Синие кружки — центры морских двухградусных «квадратов».

Fig. 1. The arrangement of grid squares used in the analysis.

сетки позволял выявлять географические районы, где присутствуют или, наоборот, отсутствуют колебания с искомым периодом.

Подобная методика была использована в работе [20], где длина цифрового фильтра составляла 41. С целью максимального сохранения длительности анализируемых рядов, неизбежно укорачивающихся в связи с цифровой фильтрацией

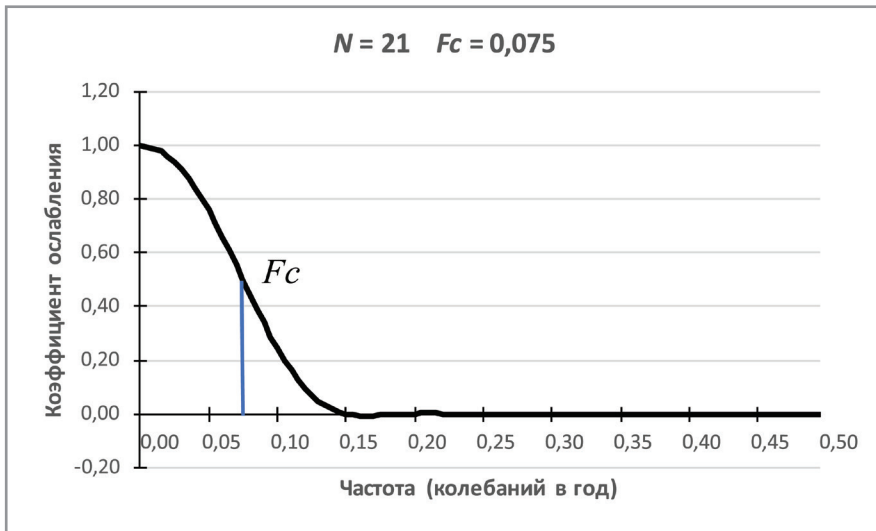


Рис. 2. Передаточная функция цифрового фильтра.

Fig. 2. Transfer function of the digital filter.

на величину $(N-1)$, где N — длина фильтра (число весовых коэффициентов), здесь использовался более короткий цифровой фильтр с $N = 21$.

Используемый цифровой фильтр обладал следующими свойствами:

— коэффициент ослабления фильтра равен 0,5 на частоте обрезания $F_c = 0,075$, что означает уменьшение амплитуды сигнала в два раза. Эта частота соответствует периоду сигнала 13,3 года.

— значение коэффициента ослабления фильтра для частоты 18,6-летнего лунного прилива близко к значению 0,72, то есть при наличии реального колебания T_0 с таким периодом амплитуда сигнала после фильтрации будет уменьшена на 28 %, поэтому для оценки истинной амплитуды цикла полученное значение нужно увеличить в $1,0/0,72 \approx 1,4$ раза.

Из графика передаточной функции цифрового фильтра видно, что сигналы с периодом 10 лет ослабляются в 4 раза, а с периодами менее 7 лет ослабляются в 100 и более раз, то есть полностью сглаживаются. Именно на высоких частотах колебаний с периодами в несколько лет зачастую содержится значительная доля общей изменчивости климатических рядов, удаление которой позволяет выделять низкочастотные колебания.

Еще одной особенностью применявшегося цифрового фильтра является отсутствие отрицательных значений передаточной функции. Это означает, что процедура фильтрации не порождает ложных колебаний, а только трансформирует амплитуды имеющихся в исходном ряду. Также применявшийся фильтр в силу своих особенностей не создает фазовых сдвигов, т. е. не сдвигает экстремумы выделяемых колебаний. При анализе результатов рассматривались значения

кросскорреляций, которые являлись статистически значимыми с доверительной вероятностью 95 % при значениях, больших 0,4 по модулю.

Результаты

Типовая автокорреляционная функция исследованных рядов аномалий T_a может иметь один или несколько максимумов. На рис. 3 в качестве примера приведена автокорреляционная функция ряда аномалий T_a зимой для квадрата № 16. На ней отчетливо выделяются три максимума, соответствующие запаздываниям 18—19, 37—38 и 57 лет.

Предварительный анализ показал, что 18,6-летние колебания аномалий T_a на исследуемой территории встречаются только в зимний период, поэтому далее рассматривались ряды месячных аномалий T_a для декабря, января, февраля и в среднем T_a за зимний период.

Для количественного анализа проявлений 18,6-летнего периода в зимних рядах T_a производился расчет коэффициентов корреляции сглаженных рядов T_a с модельной синусоидальной кривой с периодом 18,6 года, синхронизированной по времени с изменением склонения Луны в 18,6-летнем ($R_{18,6}$) цикле.

Результаты расчета $R_{18,6}$ приведены на рис. 4 для четырех массивов данных по T_a : *a*) зима, *b*) декабрь, *c*) январь, *d*) февраль. Расположение квадратов соответствует их расположению на рис. 1: западная граница региона является прибрежной, по широте квадраты расположены в зоне 20°—60° с.ш.

Учитывая, что колебания T_a под возможным влиянием лунного прилива необязательно должны быть с ним синхронны, кросскорреляционная функция

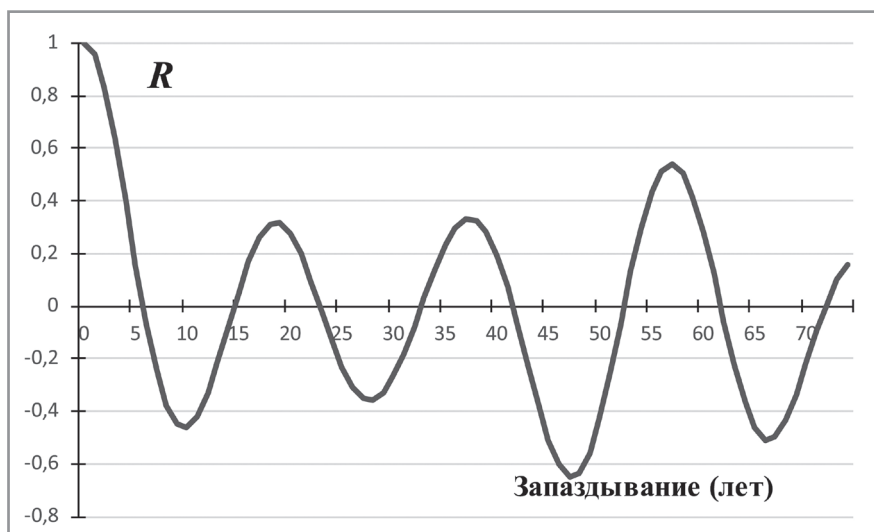


Рис. 3. Автокорреляционная функция $R(L)$ ряда зимних аномалий T_a в квадрате № 16.

Fig. 3. Autocorrelation function $R(L)$ of a series of T_a anomalies in winter in square No. 16.

рассчитывалась при разных запаздываниях. В каждом квадрате на рисунке содержится три числа: в верхнем левом углу — номер квадрата, в центре — значение коэффициента корреляции $R_{18,6}$ между сглаженными значениями T_a и отсчетами синусоидальной кривой с периодом 18,6 года, в правом нижнем углу — величина запаздывания в годах минимума T_a от максимума склонения Луны.

Из рис. 4 видно, что подавляющее большинство коэффициентов корреляции имеют отрицательный знак, что означает уменьшение T_a при росте склонения Луны в 18,6-летнем периоде, поэтому далее при анализе значений коэффициентов корреляции могут приводиться по модулю.

Для удобства анализа каждый квадрат на рисунке может иметь четыре цветовых фона: белый — малоинформативные квадраты (отсутствие изучаемых колебаний), желтый — $R_{18,6} = |0,4 \div 0,6|$, зеленый — $R_{18,6} \geq |0,6|$, голубой — квадрат с иными свойствами, отличающимися от общей тенденции.

Проанализируем рис. 4 отдельно для зимы, декабря, января, февраля.

Зима

Здесь можно отметить главную закономерность. Основная часть квадратов (19 из 30) демонстрирует статистически значимую связь сопоставляемых характеристик, что означает наличие общего физического фактора, воздействующего на атмосферу в данном регионе с периодом 18,6 года. Из этой тенденции выпадает квадрат № 11, в котором $R_{18,6} = -0,3$. Возможно, это связано со сложным рельефом местности, поскольку здесь расположена горная система Кордильеры с перепадами высот в несколько тысяч метров, с хребтами и межгорными долинами, или неточностями в исходных данных.

На рис. 4 выделяется общая область с $R_{18,6} \geq |0,6|$ (зеленые квадраты) в широтной зоне 30° — 45° , примыкающей к побережью Тихого океана. В эту область попадают семь квадратов, расположенных рядом друг с другом. В четырех из них, расположенных рядом, коэффициент корреляции $R_{18,6}$ превышает по модулю 0,7, что говорит о сильной статистической связи изучаемых характеристик. Протяженность «зеленой» области по широте и долготе составляет 15° , что эквивалентно примерно 1500 км. Протяженность общей «желто-зеленой» области вдоль меридиана составляет 30° .

На севере рассматриваемого региона выделяется квадрат № 2 с коэффициентом корреляции $R_{18,6} = -0,62$. Рядом с «зелеными» квадратами расположены «желтые» квадраты со значениями $R_{18,6}$ от $-0,6$ до $-0,4$. На юго-востоке региона выделяются 3 квадрата с номерами 28—30 (голубая область), в которых отмечается слабая, статистически незначимая положительная корреляция, которая указывает на другие механизмы связи или ее отсутствие между T_a и лунным приливом. Это неудивительно, поскольку данная географическая зона находится рядом с Мексиканским заливом, являющимся частью другого, Атлантического, океана.

Еще одной характерной чертой поля корреляций для зимы является отсутствие статистической связи между исследуемыми характеристиками на северо-востоке и востоке региона. Коэффициенты корреляции здесь малы или близки

к нулю. Соответственно, здесь находится граница региона с проявлением лунного 18,6-летнего периода. Оценки запаздывания в годах минимума T_a от максимума склонения Луны (правый нижний угол квадрата) показывают, что в северных областях рассматриваемого региона задержка по времени может достигать трех лет для северных областей и до двух — для восточных. Задержка в юго-западных областях при этом составляет 0 или 1 год.

Декабрь

Как видно на рис. 4, в декабре можно выделить общую зону из 11 квадратов на юго-западе региона, для которой значения $R_{18,6}$ статистически значимы, при этом 7 квадратов имеют коэффициенты по модулю менее 0,6, и 4 квадрата — выше 0,6. Эта зона примыкает к побережью океана. На севере выделяется только один квадрат № 2 со значением $R_{18,6} = -0,54$. На юго-востоке, как и в случае зимы, отчетливо выделяется область из трех квадратов (отмечена голубым цветом), где корреляция положительная. Задержки изменений T_a относительно лунного склонения составляют $-2 \div +2$ года в северных широтах, и равны нулю на широтах южнее 50° с.ш.

Январь

Выделяются две области: пять смежных квадратов на северо-западе и шесть смежных — на юго-западе. Обе области примыкают к побережью. Значения коэффициентов корреляции нигде не превышают по модулю 0,6, что говорит об умеренной статистической связи сопоставляемых величин. При этом область положительных корреляций на юго-востоке увеличивается по площади до 7 квадратов. Однако корреляция является статистически незначимой. Задержки изменений T_a относительно лунного склонения составляют 2—3 года на северо-западе и 0—2 года на юго-западе, т. е. по мере движения с севера на юг задержки уменьшаются.

Февраль

Выделяются 17 квадратов со значимой статистической связью, из них четыре с $R_{18,6} > |0,6|$. Эти четыре квадрата расположены на северо-западе региона. Общее расположение квадратов на схеме тяготеет к побережью океана, кроме юго-западных районов. На юго-востоке также присутствует область с положительными коэффициентами (голубая), занимающая по площади три квадрата. Задержка изменений T_a относительно лунного склонения на северо-западе составляет 2—4 года. При этом задержка для квадрата 9 составляет 6 лет, а для квадрата 12 — пять лет. Оба эти квадрата расположены вдали от побережья, на удалении порядка тысячи километров.

Подводя итог анализа коэффициентов корреляции T_a и лунного склонения, можно отметить следующее.

В центре квадрата — величина коэффициента корреляции, в левом верхнем углу — номер квадрата, в правом нижнем углу — оценка запаздывания в годах минимума T_n от максимума склонения Луны.

In the center of the square is the value of the correlation coefficient, in the upper left corner is the square number, in the lower right corner is the estimated delay in years of the minimum T_a from the maximum lunar declination.

1. В изучаемом регионе наблюдаются статистически значимые изменения T_a с периодом 18,6 лет. Указанные изменения присутствуют за весь изучаемый период времени — 100 и более лет. Характер связи со склонением Луны — отрицательный, максимумам склонения соответствуют минимальные значения T_a в лунном цикле.

2. Протяженность области проявления статистической связи вдоль побережья: от 30° до 60° с.ш.

3. Наиболее тесная связь между T_a и лунным склонением проявляется вблизи восточного побережья Тихого океана, при движении вглубь материка связь ослабевает. На удалении от побережья на восток на расстояние 1000—1500 км связь становится незначимой.

4. В южных районах изучаемого региона связь с колебаниями лунного склонения почти синхронная. В северных районах рассматриваемого региона наблюдается задержка 2—5 лет во времени наступления минимумов T_a относительно максимумов лунного склонения.

5. В годовом ходе (от декабря к февралю) наблюдается смещение зоны максимальных по модулю коэффициентов корреляции от южной границы региона к северной. В декабре максимальные по модулю коэффициенты наблюдаются на юге региона, в феврале — на севере.

6. На юго-востоке рассматриваемого региона существует область (квадраты 28—30), в которой наблюдаются положительные коэффициенты корреляции, обусловленные, вероятно, иной причиной, нежели вариации склонения Луны.

Для оценки относительной величины колебаний T_a для каждого квадрата производился расчет спектральной мощности рядов на разных частотах на основе автокорреляционной функции. Из спектра выбиралось значение, соответствующее частоте лунного деклинационного прилива. Это значение представляет собой долю дисперсии на данной частоте относительно спектральной мощности на всех частотах, которая при таком подходе равна единице. Значения спектральной мощности на частоте, соответствующей периоду 18,6 года, представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что наибольшие значения спектральной мощности наблюдаются в декабре (до 8,4 %) на северо-западе и юго-западе региона. В зимний период и в декабре выделяется наибольшее число квадратов, в которых спектральная мощность превышает значение 4 %. Наименьшие значения спектральной мощности наблюдаются в феврале. В значительном большинстве квадратов значения спектральной мощности равны 2—3 %. Это указывает на относительную слабость колебаний с лунным периодом. Обращает на себя внимание нахождение квадратов с наибольшей мощностью вблизи побережья океана. На восточной границе региона значения мощности малы. Повторяется тенденция с коэффициентами корреляции, которые наиболее велики вблизи побережья. Сравнение сегментов рисунка для декабря и февраля показывает относительно большую величину дисперсии для декабря. В декабре 18,6-летние колебания проявляются отчетливее, чем в другие месяцы.

Рассмотрим теперь графики колебаний T_a в 18,6-летнем цикле для двух областей. Выберем одну область на северо-западе и одну область на юго-западе

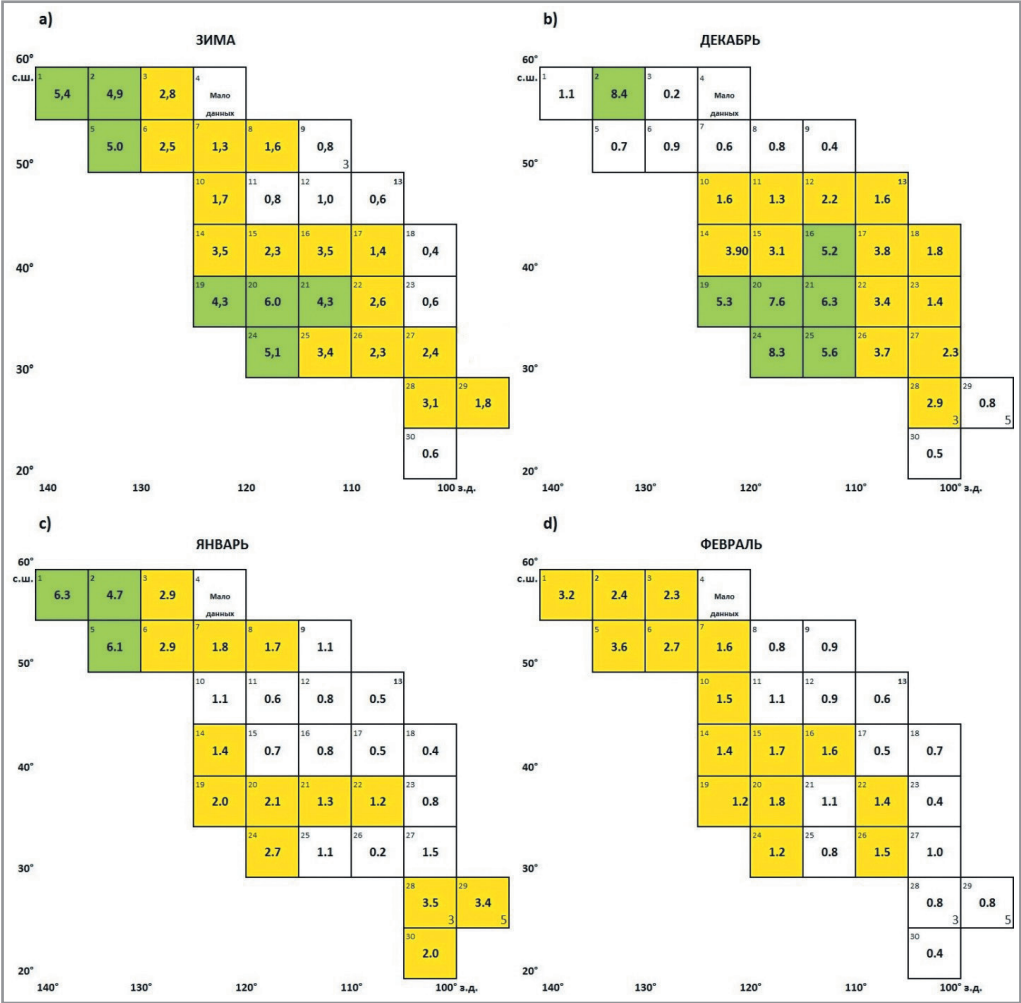


Рис. 5. Распределение доли дисперсии T_a на частоте лунного деклинационного прилива. (Желтой заливкой обозначены квадраты, в которых вклад дисперсии 18,6-летнего цикла T_a в суммарную дисперсию T_a больше 1,2 %, зеленой — больше 4,0 %). В левом верхнем углу показан номер квадрата.

Fig. 5. Distribution of the fraction of T_a dispersion at the frequency of the lunar declination tide. (The squares in which the contribution of the 18.6-year cycle T_a dispersion to the total T_a dispersion is greater than 1.2% are marked with yellow fill, and those in which the contribution is greater than 4.0 % are marked with green fill). The square number is shown in the upper left corner.

региона исследований. На рис. 6 показан межгодовой ход сглаженных по принятой в данной работе методике средних зимних и месячных колебаний T_a за декабрь, январь и февраль для квадрата 2 (северо-запад региона) в сопоставлении

с изменением склонения Луны в 18,6-летнем цикле при запаздывании T_a на три года. На рис. 6 видно, что большинство минимумов T_a для приведенных временных рядов соответствует максимумам склонения Луны. В среднем амплитуда условно синусоидальных колебаний T_a для декабря составляет около $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, для января — $0,7\text{—}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, для февраля — $0,5\text{—}1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, для зимы — $0,4\text{—}1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а с поправкой на свойства передаточной функции цифрового фильтра максимальные колебания имеют амплитуду до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

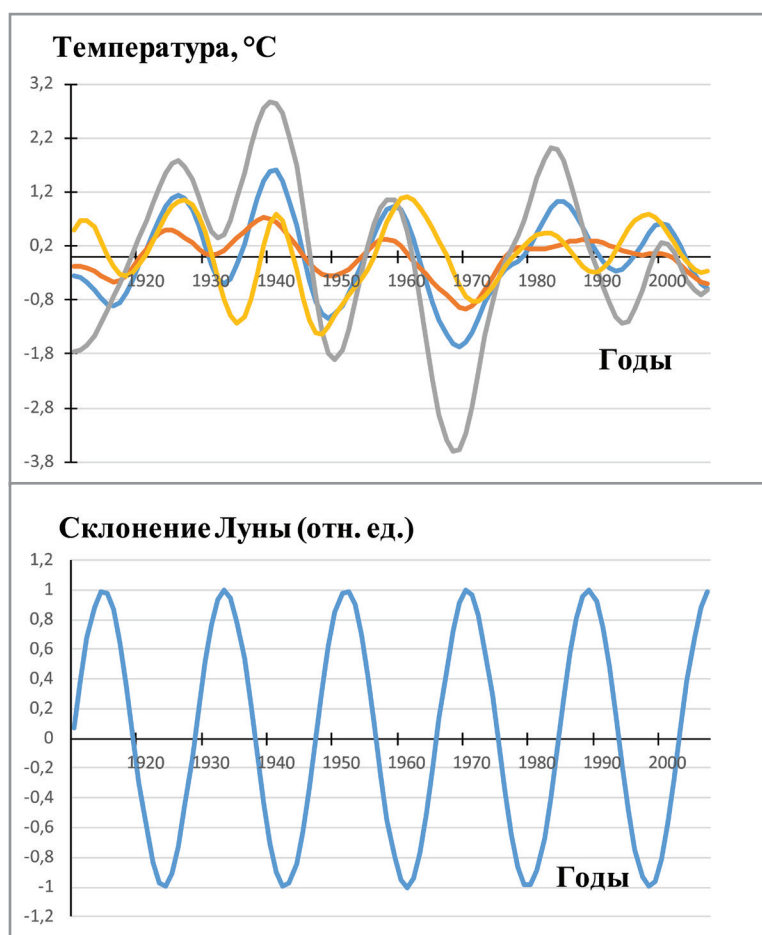


Рис. 6. Многолетний ход T_a в квадрате 2 ($57,5^{\circ}$ с.ш., $132,5^{\circ}$ з.д.) для зимы (голубая кривая), декабря (оранжевая), января (серая), февраля (желтая) в сопоставлении со склонением Луны (относительные единицы) при запаздывании изменений T_a относительно склонения на 3 года.

Fig. 6. Long-term variation of T_a in square 2 (57.5° N, 132.5° W) for winter (blue curve), December (orange), January (gray), February (yellow) in comparison with the declination of the Moon (relative units) and a lag of 3 years in the change of T_a relative to the declination.

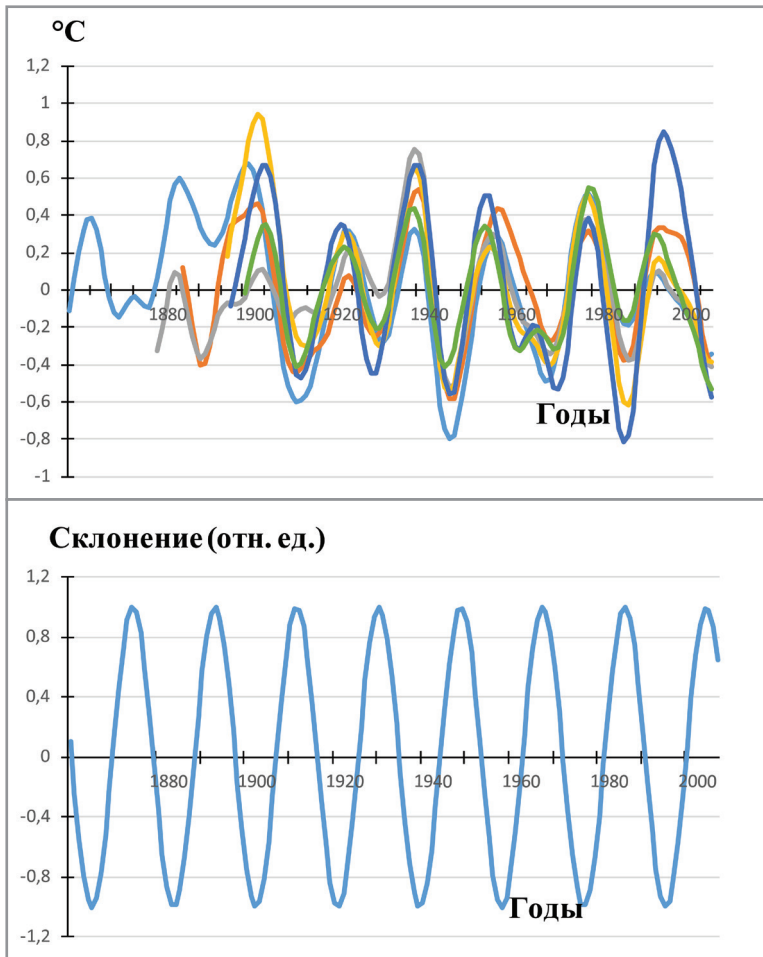


Рис. 7. Многолетний ход зимней T_a в квадратах:
14 (оранжевая кривая), 19 (серая), 20 (желтая), 21 (синяя), 24 (голубая),
25 (зеленая) в сопоставлении со склонением Луны (относительные единицы).

Fig. 7. Long-term course of winter T_a in squares:
14 (orange curve), 19 (gray), 20 (yellow), 21 (blue), 24 (light blue),
25 (green) in comparison with the declination of the Moon (relative units).

На рис. 7 показан многолетний ход сглаженных средних зимних колебаний T_a для ряда квадратов на юго-западе региона в сопоставлении с изменением склонения Луны в 18,6-летнем цикле.

Анализ рисунка показывает, что на протяжении 6—8 лунных 18,6-летних циклов наблюдается противофазное изменение зимних T_a и склонения Луны. Амплитуда колебаний T_a составляет около $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, размах колебаний — около $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. В отдельных случаях размах колебаний T_a увеличивается до $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вводя поправку

на уменьшение амплитуды сигнала при цифровой фильтрации, можно говорить, что амплитуда лунного сигнала может достигать $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Составляя результаты выполненных автокорреляционного, корреляционного и спектрального анализа, можно сделать вывод, что на западном побережье Северной Америки и вблизи него в зимних T_a выделяется периодический сигнал, совпадающий с длительностью лунного деклинационного периода 18,6 года, синхронизированный со склонением Луны, с амплитудой $1,0\text{—}2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. На севере региона амплитуда колебаний T_a больше, чем на юге, при этом величина амплитуды 18,6-летних колебаний T_a колеблется около значений от $0,3$ до $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юге региона и до $1,5\text{—}2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на севере.

Для проверки влияния возможной неоднородности временных рядов T_a , связанной с малочисленностью данных в конце XIX и в начале XX веков на полученные результаты о присутствии в рядах 18,6-летнего цикла, было проведено дополнительное сопоставление автокорреляционных функций полных рядов зимних температур в трех квадратах (16, 19 и 24) с теми же рядами, укороченными до последних 100 лет, т.е. за период 1920—2019 гг. Сопоставление показало почти полное соответствие максимумов АФ вблизи периода 19 лет. При этом расхождения в оценках АФ находятся в пределах среднеквадратической ошибки. Это подтверждает правомерность использования данных за XIX век в анализе квазидвухдецилетних колебаний температуры воздуха.

О возможных причинах изменения температуры воздуха с 18,6-летним периодом

В качестве попытки объяснения возникновения 18,6-летних колебаний T_a над западным побережьем Северной Америки, кроме описанных в литературе и связанных с диапикнальным перемешиванием воды в океане полусуточными и суточными лунными приливами [15], модулируемыми деклинационным приливом, рассматривались следующие возможные причины:

1. Колебания температуры поверхности океана T_w , которые оказывают влияние на прогрев (охлаждение) воздуха над водной поверхностью с последующим выносом воздушных масс с океана на материк.

2. Колебания циркуляции атмосферы с 18,6-летним периодом.

Рассмотрим их последовательно.

Температура поверхности океана

Для оценки возможной роли влияния изменений T_w на изменения T_a над западным побережьем Северной Америки проводилось сопоставление изменений T_w в прибрежных районах и T_a в смежных приморских районах.

Были выбраны три пары пятиградусных квадратов вблизи западного побережья с данными о T_a , и близких к ним морских двухградусных квадратов, содержащих данные T_w за период с 1854 г. по 2019 г. Центры квадратов сетки с данными о T_w обозначены на рис. 1 синими кружками. Данные T_w были подвергнуты процедурам удаления параболического тренда и цифровой фильтрации, описанным выше.

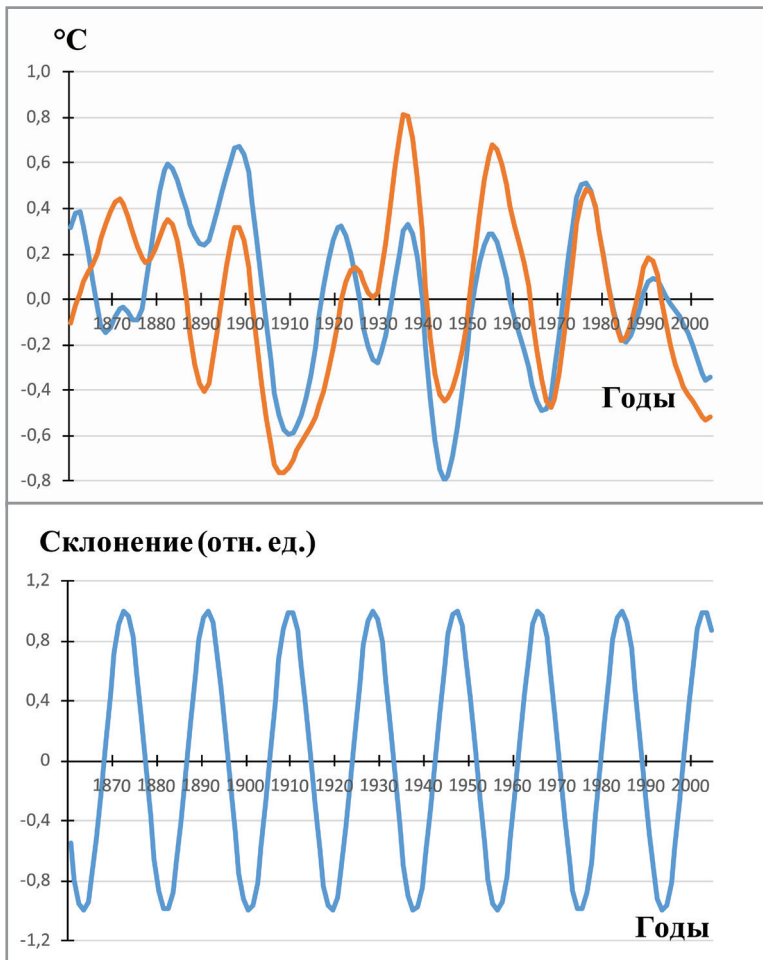


Рис. 8. Многолетний ход T_a (синяя кривая) и T_w (коричневая кривая) в сопоставлении со склонением Луны в 18,6-летнем цикле.

Fig. 8. Long-term variation of T_a (blue curve) and T_w (brown curve) in comparison with the declination of the Moon in the 18.6-year cycle.

На рис. 8 приведены сглаженные кривые T_a и T_w за зимний период (декабрь, январь, февраль) в двух соседних квадратах, причем один относится к суше, а второй к океану: квадрат 24 (32,5° с.ш., и 117,5 з.д.) и квадрат 2° × 2° (32° с.ш. и 118° з.д.). Эта пара квадратов находятся в районе г. Сан-Диего, штат Калифорния.

Обращает на себя внимание сходный вид обеих кривых на протяжении 148 лет, за исключением начального периода 1865—1880 гг. (что, возможно, связано с качеством исходных данных по T_w за указанные годы).

Коэффициент корреляции между этими рядами (R_{T_w, T_a}) положителен и равен 0,61. Если рассчитать коэффициент корреляции между этими рядами за последние 100 лет, то он существенно выше $R_{T_w, T_a} = 0,76$. При этом T_w , как видно из рисунка, сама испытывает колебания с периодом, близким к 18,6 года. Рассчитанное стандартное отклонение для ряда T_w составляет $0,37^\circ\text{C}$, для T_a — $0,35^\circ\text{C}$, т.е. изменчивость T_w несколько выше изменчивости T_a .

Проведенное аналогичным образом сопоставление кривых T_a и T_w для двух смежных пар квадратов сетки, расположенных вдоль побережья на север от первой пары квадратов и удаленных друг от друга на 10° по широте, дало следующие значения коэффициентов корреляции:

1. ($42,5^\circ$ с.ш., $122,5^\circ$ з.д.) $\div$ (42° с.ш., 124° з.д.) $R_{T_w, T_a} = 0,73$ (длина рядов 122 года),
2. ($52,5^\circ$ с.ш., $127,5^\circ$ з.д.) $\div$ (52° с.ш., 128° з.д.) $R_{T_w, T_a} = 0,81$ (длина рядов 104 года).

Отсюда видно, что между временными рядами T_a и T_w для трех разных пар квадратов отмечаются достаточно синхронные колебания на частоте деклинационного прилива с примерно одинаковой амплитудой. В связи с этим естественно предположить, что причиной изменений T_a в 18,6-летнем цикле является T_w . В его пользу говорит и то обстоятельство, что в обычных условиях T_a над сушей изменяется в большем диапазоне, чем T_w из-за разной теплоемкости этих сред. На возможное влияние изменений T_w на T_a указывает также отсутствие колебаний T_a с 18,6-летним периодом на восток от западного побережья Северной Америки, поскольку с расстоянием влияние океана на условия на суше ослабевает.

Колебания циркуляции атмосферы и океана

Поскольку в литературе имеются сведения об изменении индексов атмосферной циркуляции с лунным деклинационным периодом [17], было решено рассмотреть этот вопрос более внимательно. Для этого привлекались данные по индексам PNA и NPI , описывающим укрупненные характеристики атмосферы Северной части Тихого океана. Также были рассмотрены колебания индекса PDO , характеризующего T_w в акватории Тихого океана севернее 20° с.ш.

а) Индекс PNA.

Тихоокеанский / североамериканский индекс PNA (*Pacific/North American Pattern*) представляет собой разность давления между алеутским минимумом и областью высокого давления над Скалистыми горами. Во время положительной фазы PNA алеутский минимум в заливе Аляска углубляется, а гребень высокого давления над Скалистыми горами усиливается, т. е. пространственный градиент давления увеличивается. Положительная фаза PNA приводит к повышению температуры воздуха в западной части Северной Америки и к похолоданию на юге США [21]. Значения индекса имеются для периода, начиная с 1950 г. и приводятся на сайте (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/PNA/).

Значения месячных индексов PNA в зимний период подвергались принятой в этой работе процедуре удаления параболического тренда и низкочастотной фильтрации. Далее рассчитывались автокорреляционные функции индекса.

Анализ автокорреляционных функций показал, что для ноября характерен период колебаний индекса 22 года, для декабря — 15 лет, для января — 23—24 года, для февраля — 19 лет, для марта — 13 лет, для апреля автокорреляционная функция вообще не имела максимумов. В среднем для трех зимних месяцев (декабрь, январь, февраль) автокорреляционная функция имела максимум при запаздывании 21 год. Это означает, что влияние лунного деклинационного прилива на характеристики циркуляции атмосферы в зоне, описываемой индексом *PNA*, либо отсутствует, либо проявляется на ограниченных периодах времени, соответствующих одному месяцу в году — февралю. Периоды 23—24 годы в январе и 21—22 года (ноябрь, зима) по длительности более свойственны двойному солнечному циклу.

Для февраля, где автокорреляционная функция имела максимум для периода 19 лет, наблюдалась отрицательная статистическая связь сглаженного индекса *PNA* с кривой лунного склонения в 18,6-летнем цикле, причем, при запаздывании индекса относительно склонения Луны на 3 года. При этом коэффициент корреляции составлял $-0,96$. Минимальные значения индекса *PNA* наблюдались спустя 3 года после максимумов склонения Луны. В энергетическом спектре на период 20 лет, близком к длительности лунного деклинационного прилива, приходилось только 3,6 % мощности спектральной плотности. Основная мощность колебаний в спектре наблюдалась для высокочастотных колебаний с периодами менее 10 лет.

Таким образом, индекс *PNA* в месячном разрезе проявляет сходство своих колебаний с деклинационным приливом только в одном месяце из пяти рассмотренных.

Резюмируя краткий анализ индекса *PNA*, можно отметить, что длительность периода наблюдений за индексом *PNA*, рассчитываемым с 1950 г., вероятно, пока недостаточна для его применения в анализе квазидвадцатилетних колебаний параметров атмосферы над Тихим океаном и Северной Америкой. Кроме того, индекс *PNA* имеет в своей основе слишком большой территориальный охват с абсолютно различными физико-географическими условиями и климатообразующими факторами, поэтому он далее не рассматривался.

б) Индекс *NPI*.

Северотихоокеанский индекс *NPI* (*North Pacific Index*, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter>) представляет собой взвешенное по площади давление на уровне моря в регионе 30° — 65° с.ш., 160° в.д.— 140° з.д. (протяженность 60° по долготе и 35° по широте, что составляет 4—6 тыс. км) [22].

Анализировались ежемесячные данные за период с 1899 г. (начало расчета индекса) по 2022 г., всего 124 года. Рассчитывались автокорреляционные функции и энергетические спектры рядов индекса *NPI* за отдельные месяцы: декабрь, январь и февраль. К рядам применялась общая методика предварительной обработки данных, описанная ранее.

На рис. 9 приведен график автокорреляционной функции сглаженного индекса *NPI*. Автокорреляционная функция сглаженного январского индекса *NPI* имеет небольшой максимум при запаздывании 19 лет ($R = 0,15$) и максимум при

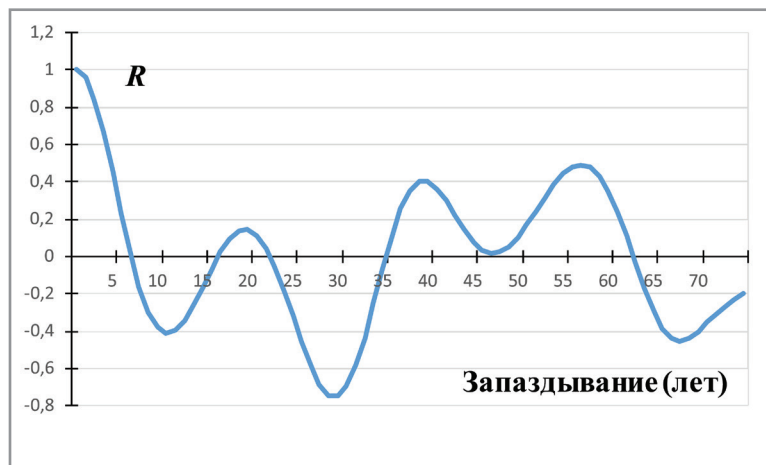


Рис. 9. Автокорреляционная функция сглаженного январского индекса *NPI*.

Fig. 9. Autocorrelation function of the smoothed January *NPI* index.

запаздывании 38—39 лет ($R = 0,40$), которое близко по значению к двойному 18,6-летнему периоду лунного склонения.

Расчет энергетического спектра исходного, несглаженного, январского ряда индекса выявил наличие локального пика в спектре на частоте, соответствующей периоду 18,6 года, с дисперсией около 5 %. Расчет такого же спектра для сглаженного январского ряда индекса показал, что на 18,6-летний период приходится дисперсия, равная 23 %. Основная часть дисперсии при этом приходится на более длинные периоды изменений индекса.

Полученные результаты указывают на наличие 18,6-летних колебаний в январских значениях индекса *NPI*, хотя они не являются доминирующими по сравнению с колебаниями с более длинными периодами. В февральских значениях индекса *NPI* также содержится колебание с периодом 18,6 года, но слабее выраженное. В декабрьском ряду 18,6-летних колебаний индекса *NPI* в энергетических спектрах не выявляется.

Также был произведен расчет коэффициентов корреляции сглаженных значений январского индекса *NPI* со значениями склонения Луны в 18,6-летнем цикле. Расчет показал значимую корреляцию между этими двумя рядами, равную 0,53 для синхронного сравнения рядов, и 0,64 для сдвига рядов друг относительно друга на 2 года при опережении склонения Луны в 18,6-летнем цикле.

Таким образом, выявляется статистическая связь между величиной склонения Луны и изменением индекса *NPI*, и, соответственно, изменением атмосферного давления над северной частью Тихого океана, причем рост склонения Луны вызывает рост атмосферного давления на величину от 0,5 до 2 гПа. При этом размах колебаний давления от одной фазы лунного цикла до другой и в разные годы может составлять 4 и более гПа. Корреляция сглаженных февральских значений индекса *NPI* со значениями склонения Луны в 18,6-летнем цикле при сдвиге

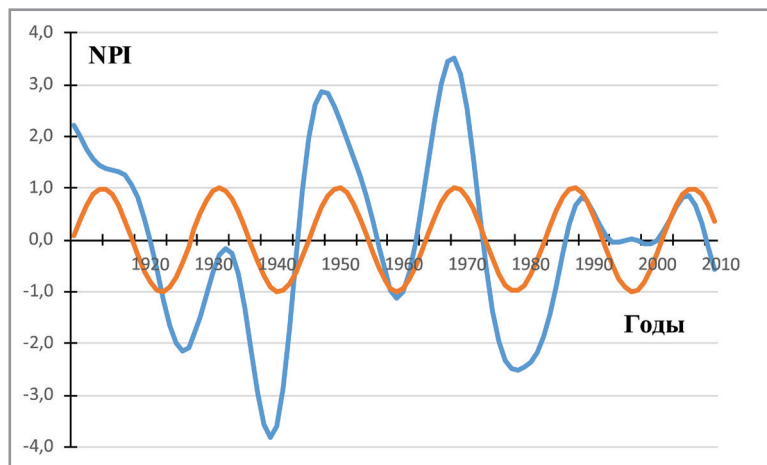


Рис. 10. Сглаженные значения январского индекса *NPI* (синяя кривая) и склонение Луны в 18,6-летнем цикле (оранжевая кривая) со сдвигом 2 года (индекс *NPI* запаздывает).

Fig. 10. Smoothed values of the January *NPI* index (blue curve) and the declination of the Moon in the 18.6-year cycle (orange curve) with a shift of 2 years (the *NPI* index lags).

2 года дает значение коэффициента корреляции 0,52, что также является статистически значимой величиной. Декабрьские значения индекса *NPI* в сопоставлении с приливным циклом Луны показывают статистическую связь с коэффициентом корреляции около 0,3.

Произведенный расчет коэффициента корреляции между сглаженными значениями индексов *NPI* за январь и за три зимних месяца дал результат с доверительной вероятностью 0,89, что указывает на схожесть поведения сглаженных индексов в каждый из трех зимних месяцев, а также на преобладающий вклад изменений значений индекса в январе на изменения индекса за зиму.

Полученные результаты в целом подтверждают и конкретизируют имеющиеся в литературе данные о наличии 18,6-летнего цикла в колебаниях атмосферного давления над северной частью Тихого океана в зимний период. Расчет коэффициентов корреляции между сглаженными значениями индекса *NPI* в зимний период и сглаженными зимними значениями температуры в прибрежных районах (квадраты № 2, 10, 14, 19, 24) показал отрицательную связь между ними с $R = -0,50 \div -0,77$, однако эта связь при движении на восток вглубь материка снижалась быстрее, чем связь с лунным склонением.

в) Индекс *PDO*.

Тихоокеанское десятилетнее колебание *PDO* (*Pacific Decadal Oscillation*) характеризует долгопериодную изменчивость ТПО в северной (выше 20° с.ш.) части Тихого океана. Положительные значения индекса *PDO* соответствуют отрицательным аномалиям T_w в центральной и западной частях северного бассейна Тихого океана (простирающимся на восток от Японии) и положительным аномалиям T_w в восточной части северного бассейна Тихого океана (вдоль западного

побережья Северной Америки). Положительная фаза *PDO* также связана с положительными аномалиями T_w в центральной и восточной частях тропической части Тихого океана. Ежемесячные и годовые данные *PDO* доступны с 1854 г. и приводятся на сайте https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/PDO/.

Статистический анализ индекса *PDO*, выполненный по принятому в данной работе алгоритму, показал, что из трех зимних месяцев наилучшее проявление 18,6-летнего цикла в индексе наблюдается в январе и феврале, доля общей дисперсии на этой частоте составляет 5,7—6,8 %. Для средних значений индекса за три зимних месяца доля дисперсии на частоте лунного цикла составляет 5,6 %. При этом сходный по величине размер дисперсии приходится и на период 21,1 года.

Сопоставление сглаженных месячных значений индекса *PDO* со склонением Луны в 18,6-летнем цикле показало статистическую связь между ними: коэффициенты корреляции для января и февраля оказались отрицательными и составили значения $-0,40$ для января и февраля и $-0,31$ для декабря. При длине анализируемых рядов, равных после сглаживания 148 отсчетам, такая статистическая связь для января и февраля является статистически значимой и должна приниматься во внимание. Дополнительно рассчитывалась корреляция между несглаженными индексами *PDO* и *NPI*. Для декабря коэффициент корреляции составил $-0,37$, для января и февраля $-0,46$. Это означает, что изменения давления находятся в противофазе с изменением T_w . Расчет коэффициентов корреляции сглаженных месячных значений обоих индексов показал наличие отрицательной связи со значениями коэффициентов корреляции: декабрь: $-0,76$, январь: $-0,81$, февраль $-0,75$. Отсюда видно, что колебания давления и $T_{по}$ с периодами более 13 лет (частота обрезания использовавшегося фильтра) находятся в сильной отрицательной статистической связи.

Противофазность колебаний индексов *NPI* и *PDO* в зимний период, вероятно, имеет под собой физическую природу. Увеличение атмосферного давления (рост значения индекса *NPI*) соответствует антициклоническому характеру циркуляции атмосферы, уменьшению количества облачности, ясному небу, при котором в зимний период на фоне слабого притока прямой солнечной радиации происходит выхолаживание, уменьшение T_w в восточной части Северного бассейна Тихого океана. Соответственно, уменьшение атмосферного давления соответствует циклоническому характеру циркуляции и увеличению облачности, которая препятствует выхолаживанию поверхности океана.

Проверка процедуры фильтрации

С целью проверки надежности полученных выводов о колебаниях T_a на основе примененной процедуры фильтрации временных рядов фильтром с частотой обрезания $F_c = 0,075$ был проведен анализ результатов фильтрации с применением еще одного фильтра с частотой обрезания $F_c = 0,15$ и длиной весовой функции, равной 21 коэффициенту. С этой целью использовались зимние значения T_a для квадрата 20.

На рис. 11 изображены автокорреляционные функции (*a*) и сглаженные аномалии T_a (*б*) для фильтров с частотой обрезания $F_c = 0,075$ и $F_c = 0,150$. Более

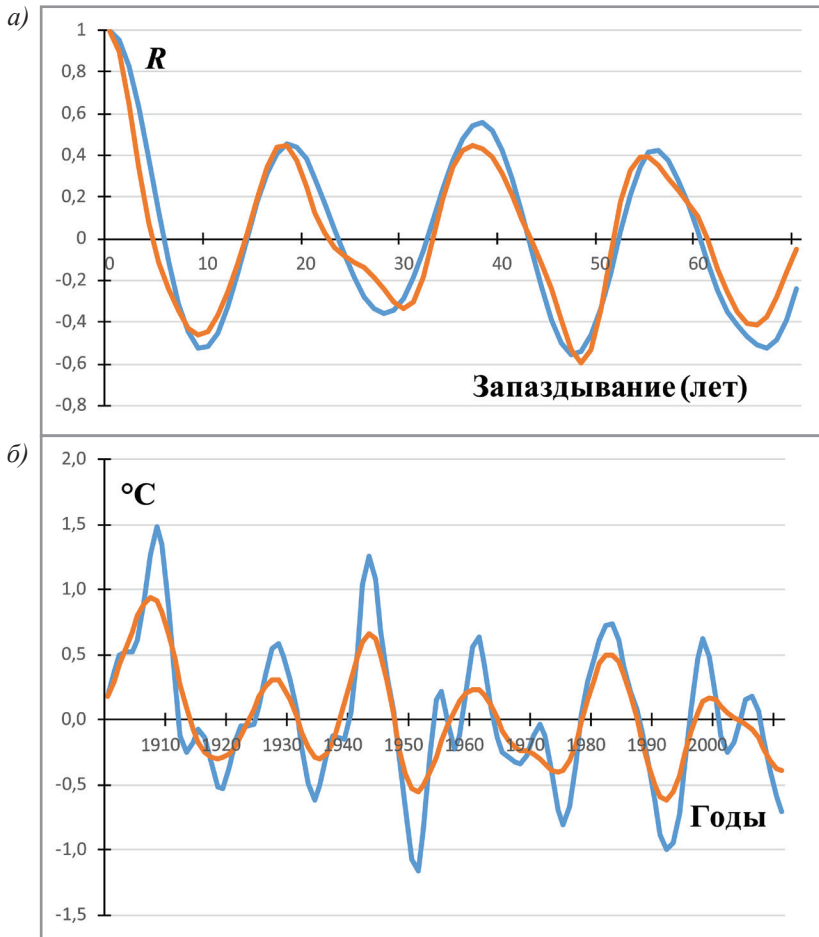


Рис. 11. Автокорреляционные функции (а) и сглаженные зимние аномалии T_a в квадрате 20 (б) для фильтров с частотой обрезания $F_c = 0,075$ и $F_c = 0,150$.

Fig. 11. Autocorrelation functions (a) and smoothed winter anomalies T_a squared by 20 (b) for filters with cutoff frequencies $F_c = 0.075$ and $F_c = 0.150$.

гладкие кривые относятся к первому фильтру, менее гладкие — ко второму. Применение фильтра с меньшей частотой обрезания (0,075) позволяет выделить главные закономерности процесса без учета высокочастотной изменчивости.

Из обоих графиков на рис. 11 видно, что моменты достижения максимумов и минимумов как автокорреляционных функций, так и аномалий T_a практически не зависят от частот обрезания фильтра, хотя частоты и отличаются в два раза. Кривые на рис. 11 подтверждают обоснованность методики обработки данных, содержащих лунный приливной сигнал, и не случайность выявленных 18,6-летних колебаний T_a .

Обсуждение

Основной вопрос, который возникает при анализе полученных результатов, заключается в возможном механизме генерации отмеченных колебаний T_a с периодом 18,6 года. Изменение индекса атмосферной циркуляции PNA с изучаемым периодом наблюдается только для февраля, причем, при запаздывании индекса относительно склонения Луны на 3 года. Такое запаздывание, или с близким значением, в проанализированных данных наблюдалось только в северных областях рассматриваемого региона в феврале. Изменение индекса PNA в декабре и январе не имеет колебаний с лунным периодом, поэтому изменения индекса PNA могут лишь частично объяснять колебания T_a . При этом индекс PNA содержит в себе большой охват территории, включая Центральную Канаду и центральную часть США, где 18,6-летние колебания в зимний период в данной работе не обнаружены. Выявленная зона колебаний T_a ограничивается только приморскими и близкими к ним территориями, поэтому влияние изменений индекса PNA на изменения T_a представляется неоднозначным. Требуется продолжение наблюдений за индексом PNA в течение значительного времени.

Рассматривая индекс NPI , можно отметить, что в зимний период он испытывает колебания с периодом около 18,6 года. Рост склонения Луны вызывает рост атмосферного давления на величину до 1—3 гПа. При этом задержка максимумов NPI относительно максимумов лунного склонения составляет 2 года. Такая задержка уже более близка к найденным средним задержкам колебаний T_a , что свидетельствует о том, что атмосфера над океаном откликается на изменение приливообразующей силы Луны. При росте склонения Луны над Северным полушарием, вероятно, происходит переток воздушных масс от экватора в сторону полюса, поэтому в высоких широтах повышается давление воздуха.

Выполненный анализ индекса PDO показал наличие сигнала с периодом 18,6 года. Индекс PDO противофазен и синхронен со склонением Луны и совпадает по фазе с кривыми изменения T_w в трех исследованных квадратах вблизи западного побережья Северной Америки при том, что эти квадраты разнесены в пространстве на 10° и 20° по широте. Отсюда можно сделать вывод о вероятном влиянии на T_a на западном побережье Северной Америки изменений циркуляции атмосферы над Тихим океаном и T_w в его восточной части в 18,6-летнем цикле лунного деклинационного прилива.

Вопрос о проявлении на изученной территории 18,6-летних колебаний аномалий T_a только в зимний сезон может быть объяснен минимальным влиянием радиационных факторов в его годовом ходе на температурный режим. Выделение на юго-востоке изученного региона области с иными статистическими свойствами также подчеркивает ограниченность зоны влияния лунного деклинационного прилива на температуру.

Заключение

Анализ многолетних изменений месячных аномалий T_a в западной части Северной Америки позволил выявить регион, в котором выделяются 18,6-летние

колебания. Данный регион примыкает к западному побережью Северной Америки и простирается по широте от 30° до 60° с.ш. и до 15° к востоку от западного побережья. Его характерные геометрические размеры 1—3 тыс. км. Колебания с периодом 18,6 года проявляются только в зимний сезон, когда влияние радиационных факторов минимально.

Полученные результаты подтверждают влияние 18,6-летнего лунного прилива на T_a прибрежных районов материка, однако это влияние имеет региональный и сезонный характер. Найденное значение амплитуды 18,6-летнего температурного сигнала от $0,3$ до $1,0^\circ\text{C}$ на юге региона и до $1,5$ — $2,0^\circ\text{C}$ на севере не представляется значительным, но сам факт устойчивости колебаний на протяжении по крайней мере восьми лунных 18,6-летних циклов говорит о наличии физического механизма, вызывающего указанные колебания T_a .

Сходное поведение температуры поверхности океана T_w и воздуха в зоне выраженности течения (30° — 50° с.ш.) позволяет говорить о колебаниях T_w с частотой лунного деклинационного прилива, как возможном региональном климатообразующем факторе.

В качестве возможной причины 18,6-летних колебаний T_a в настоящее время можно говорить о вариациях комплекса гидрометеорологических (атмосферных и океанических) характеристик в бассейне Тихого океана вследствие их взаимокоррелированности друг с другом в лунном 18,6-летнем цикле. Поскольку идентичность колебаний T_a и T_w отмечена в прибрежных и приморских районах, то в дальнейшем необходимо более детальное выявление закономерностей квазидвадцатилетних изменений T_w на значительном удалении от побережья Северной Америки.

Однако, принимая во внимание влияние возможной неоднородности временных рядов T_a , связанной с малочисленностью данных в конце XIX и в начале XX веков, на полученные результаты, то их можно рассматривать как предварительные, которые в дальнейшем могут быть уточнены путем привлечения к расчетам конкретных длиннорядных станций.

Список литературы

1. Currie R. G. Luni-solar 18.6- and solar cycle 10-11-year signals in USA air temperature records // International Journal of climatology. 1993. Vol. 13. Iss. 1. P. 31—50.
2. Currie R. G. Evidence for 18.6 year Mn signal in temperature and drought conditions in North America since AD 1800 // JGR Oceans. 1981. Vol. 86, C11, P. 11055—11064. <https://doi.org/10.1029/JC086iC11p11055>.
3. Guiot J. Reconstruction of seasonal temperatures in central Canada since a.d.1700 and detection of the 18,6- and 22-year signals // Climatic Change. 1987. Vol. 10. P. 249—268.
4. McKinnell S. M., Crawford W. R. The 18.6-year lunar nodal cycle and surface temperature variability in the northeast Pacific // Journal of geophysical research. 2007. Vol. 112, C02002. P. 1—15. doi: 10.1029/2006JC003671.
5. Royer T. C. High-latitude oceanic variability associated with the 18.6-year nodal tide // Journal of geophysical research. 1993. Vol. 98. № C3. P. 4639—4644.
6. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. Л: Гидрометеиздат, 1970. 448 с.
7. Воробьев В. Н., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Лунный нодальный (деклинационный) прилив и его возможное влияние на циркуляцию атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2006. № 2. С. 7—19.

8. Воробьев В. Н., Косенко А. В., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Многолетний лунный деklinационный прилив и динамика центров действия атмосферы Южного полушария // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 16. С. 28—40.
9. Логинов В. Ф. Космические факторы климатических изменений. Минск: Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, 2020. 168 с.
10. Зотов Л. В., Сидоренков Н. С., Бизуар К. О движениях Луны как возможном климатообразующем факторе // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2015. № 222. С. 41—48.
11. Yasuda I. Impact of the astronomical lunar 18.6-yr tidal cycle on El-Niño and Southern Oscillation // Scientific reports. 2018. Vol.8, No.15206. P.1—7. doi: 10.1038/s41598-018-33526-4.
12. O'Brien D. P., Currie R. G. Observations of the 18,6-year cycle of air pressure and a theoretical model to explain certain aspects of this signal // Climate dynamics. 1993. Vol. 8. P. 287—298.
13. Yndestad H. Jovian planets and lunar nodal cycles in the earth's climate variability // Frontiers in astronomy and space sciences. 2022. Vol. 9. P. 1—19.
14. Рогачев К. А., Шлык Н. В. Вариации солености промежуточных вод Ойясио и их связь с лунным нодальным циклом // Океанология. 2018. Т. 58. № 1. С. 5—10.
15. Loder J. W. and Garrett C. The 18.6 year Cycle of Sea Surface Temperature in Shallow Seas Due to Variations in Tidal Mixing // J. Geophys. Res. 1978. Vol. 83. NO. C4. P. 1967—1970.
16. Cervený R., Shaffer J. The Moon and El Niño // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. Issue 1, P. 25—28. <https://doi.org/10.1029/2000GL012117>.
17. Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д. Изменчивость и взаимосвязь основных климатических индексов для северной части Тихого океана: тренды, климатические сдвиги, спектры, корреляции // Известия ТИИРО. 2019. Т. 199. С. 163—178.
18. Osborn T. J., Jones P. D. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. // Earth System Science Data. 2014. Vol. 6. P. 61—68. doi.org/10.5194/essd-6-61-2014.
19. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 428 с.
20. Молодых В. А. О 21-летних колебаниях температуры воздуха // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 146—158.
21. Trenberth K., Hurrell J. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific // Climate Dynamics. 1994. Vol 9. P. 303—319. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00204745>.
22. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. 1987. V. 115. P. 1083—1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.

References

1. Currie R. G. Luni-solar 18.6- and solar cycle 10-11-year signals in USA air temperature records. *International Journal of climatology*. 1993; 13(1): 31—50.
2. Currie R. G. Evidence for 18.6 year Mn signal in temperature and drought conditions in North America since AD 1800. *JGR Oceans*. 1981; 86(11): 11055—11064. <https://doi.org/10.1029/JC086iC11p11055>.
3. Guiot J. Reconstruction of seasonal temperatures in central Canada since a.d.1700 and detection of the 18.6- and 22-year signals. *Climatic Change*. 1987; (10): 249—268.
4. McKinnell S. M., Crawford W. R. The 18.6-year lunar nodal cycle and surface temperature variability in the northeast Pacific. *Journal of geophysical research*. 2007; (112): 1—15. doi: 10.1029/2006JC003671.
5. Royer T. C. High-latitude oceanic variability associated with the 18.6-year nodal tide. *Journal of geophysical research*. 1993; 98(3): 4639—4644.
6. Maksimov I. V. *Geofizicheskiye sily i vody okeana = Geophysical forces and waters of the ocean*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970; 448 p. (In Russ.).
7. Vorobiev V. N., Sarukhanyan E. I., Smirnov N. P. Lunar nodal (declination) tide and its possible influence on atmospheric circulation. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2006; (2): (7—19). (In Russ.).
8. Vorobiev V. N., Kosenko A. V., Sarukhanyan E. I., Smirnov N. P. Multi-year lunar declination tide and the dynamics of the centers of action of the atmosphere of the Southern Hemisphere. *Uchenyye zapiski*

- Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2010; (16): (28—40). (In Russ.).
9. Loginov V. F. *Kosmicheskiye faktory izmeneniya klimata* = *Space factors of climate change*. Minsk: Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, 2020; 168 p. (In Russ.).
 10. Zotov L. V., Sidorenkov N. S., Bizuar K. On the movements of the Moon as a possible climate-forming factor. *Byulleten' Glavnoy astronomicheskoy observatorii v Pulkovo* = *Bulletin of the Main Astronomical Observatory in Pulkovo*. 2015; (222): (41—48). (In Russ.).
 11. Yasuda I. Impact of the astronomical lunar 18.6-yr tidal cycle on El-Niño and Southern Oscillation. *Scientific reports*. 2018; 8(15206): 1—7. doi: 10.1038/s41598-018-33526-4.
 12. O'Brien D. P., Currie R. G. Observations of the 18.6-year cycle of air pressure and a theoretical model to explain certain aspects of this signal. *Climate dynamics*. 1993; (8): 287—298.
 13. Yndestad H. Jovian planets and lunar nodal cycles in the earth's climate variability. *Frontiers in astronomy and space sciences*. 2022; (9): 1—19.
 14. Rogachev K. A., Shlyk N. V. Variations in the salinity of Oyashio intermediate waters and their relationship with the lunar nodal cycle. *Okeanologiya* = *Oceanology*. 2018; 58(1): (5—10). (In Russ.).
 15. Loder J. W. and Garrett C. The 18.6 year Cycle of Sea Surface Temperature in Shallow Seas Due to Variations in Tidal Mixing. *J. Geophys. Res.* 1978; 83(4): 1967—1970.
 16. Cervený R., Shaffer J. The Moon and El Niño. *Geophys. Res. Lett.* 2001; 28(1): 25—28. <https://doi.org/10.1029/2000GL012117>.
 17. Hen G. V., Ustinova E. I., Sorokin Yu. D. Variability and interrelationship of the main climate indices for the northern part of the Pacific Ocean: trends, climate shifts, spectra, correlations. *Izvestiya TINRO* = *Izvestia TINRO*. 2019; (199): (163—178). (In Russ.).
 18. Osborn T. J., Jones P. D. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. *Earth System Science Data*. 2014; (6): 61—68. doi: [10.5194/essd-6-61-2014](https://doi.org/10.5194/essd-6-61-2014).
 19. Otnes R., Enokson L. *Prikladnoy analiz vremennykh ryadov. Osnovnyye metody* = *Applied Time Series Analysis. Basic Methods*. Moscow: Mir, 1982; 428 p. (In Russ.).
 20. Molodykh V. A. On 21-year fluctuations in air temperature. *Trudy VNIIGMI-MKD* = *Proceedings of VNIIGMI-MCD*. 2023; (191): (146—158). (In Russ.).
 21. Trenberth K., Hurrell J. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*. 1994; (9): 303—319. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00204745>.
 22. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.* 1987; (115): 1083—1126. doi: [10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2).

Информация об авторах

Молодых Владимир Анатольевич, кандидат географических наук, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», г. Санкт-Петербург; vam3@rambler.ru.

Information about authors

Molodykh Vladimir Anatolyevich, PhD in Geographical Sciences, Deputy Director of the Federal State Budgetary Institution “A. I. Voeikov Main Geophysical Observatory”, St. Petersburg.

Статья поступила 22.08.2024

Принята после доработки в печать 11.11.2024

The article was received on 22.08.2024

The article was accepted after revision on 11.11.2024

Научная статья

УДК [502.3+502.521](51.53.55)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-716-738

Распределение полихлорированных бифенилов в системе почва–атмосфера на южном побережье озера Байкал

***Дмитрий Геннадьевич Левшин, Михаил Алексеевич Запевалов,
Антон Игоревич Бурков***

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, Российская
Федерация, levshin@rpatyphoon.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности распределения индикаторных конгенов полихлорированных бифенилов (ПХБ) в системе почва–атмосфера в г. Байкальске и прилегающей территории. Показано, что промышленная зона Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) является вероятным источником поступления этих веществ в атмосферный воздух. Установлено превышение ориентировочно-допустимых концентраций суммы ПХБ в семнадцати пробах почв. Проведена оценка географического местоположения локального источника поступления ПХБ в атмосферу на южном побережье оз. Байкал. По данным мониторинга ПХБ в почвах и атмосферном воздухе в 2021—2023 гг. установлены направления потоков переноса ПХБ из почвы в атмосферный воздух, которые имеют выраженный сезонный характер. Для всех рассмотренных конгенов ПХБ в теплый период (апрель–октябрь) преобладает испарение с поверхности почвы.

Ключевые слова: озеро Байкал, полихлорированные бифенилы (ПХБ), атмосферный воздух, почвы, фугитивность.

Благодарности: Работа выполнена в рамках федерального проекта «Сохранение озера Байкал» национального проекта «Экология». Анализ проб выполнен в лаборатории ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун» (аттестат аккредитации №RA.RU.21BA01). Авторы выражают благодарность Д. П. Самсонову, А. И. Кочеткову, Е. М. Пасынковой за выполнение работ по анализу ПХБ в пробах воздуха и почв.

Для цитирования: Левшин Д. Г., Запевалов М. А., Бурков А. И. Распределение полихлорированных бифенилов в системе почва–атмосфера на южном побережье озера Байкал // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 716—738. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-716-738.

Original article

Distribution of polychlorinated biphenyls in the soil–atmosphere system on the southern coast of Lake Baikal

Dmitry G. Levshin, Mikhail A. Zapevalov, Anton I. Burkov

Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russian Federation, levshin@rpatyphoon.ru

Summary. The article presents the current levels of polychlorinated biphenyls (PCBs) in atmospheric air and soils of the southern coast of Lake Baikal. According to the level of PCB content in the atmospheric air, the studied area can be attributed to areas exposed to man-made emissions characteristic of large industrial cities. An unorganized source of secondary PCB environmental pollution in the area of Baikalsk, located on the territory of the industrial site of the now defunct Baikalsk Pulp and Paper Mill (BPPM), as well as local sites in the areas of waste landfills, was discovered and investigated. Using statistical methods and the concept of fugitives, the geographical location and spatial dimensions of the territory that is the source of PCBs entering the atmospheric air are estimated. The area of the territory and the density of contamination of the soil surface with PCBs on it amounted to 2,7 km² and 0,013 g/m², respectively.

Based on the experimental data of PCB monitoring in soils and atmospheric air in 2021–2023, the directions of PCB transfer flows from soil to atmospheric air, which have a pronounced seasonal character, have been established. For all the considered PCB congeners, evaporation from the soil surface prevails during the year (65 % of the total number of air samples). During the cold period, equilibrium processes prevail (20 % of cases) or deposition of PCBs from the atmosphere (15 % of cases). In the warm period of the year from April to October, the calculation results demonstrate the dominance of evaporation processes (93,4 % of the total number of samples), in the remaining 6,6 % of cases, the system is in equilibrium, precipitation is not observed.

Keywords: lake Baikal, polychlorinated biphenyls (PCBs), atmospheric air, soils, fugacity.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the federal project “Preservation of Lake Baikal” of the national project “Ecology”. The samples were analyzed in the laboratory of the IPM FSBI «NPO «Typhoon» (certificate of accreditation №RA.RU.21A01). The authors express their gratitude to D. P. Samsonov, A. I. Kochetkov, and E. M. Pasinkova for their work on the analysis of PCBs in air and soil samples.

For citation: Levshin D. G., Zapevalov M. A., Burkov A. I. Distribution of polychlorinated biphenyls in the soil–atmosphere system on the southern coast of Lake Baikal. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):716—738. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-716-738.

Введение

Озеро Байкал — крупнейший в мире природный пресноводный водоем, самое большое по площади водного зеркала (31500 км²) пресноводное озеро в Евразии и самое глубокое в мире (1637 м). В глубинах озера содержится 20 % мировых запасов поверхностных пресных вод и более 90 % запасов России. В нем обитает много редких и эндемичных видов флоры и фауны. В декабре 1996 г. ЮНЕСКО включило Байкал в Список объектов всемирного природного наследия [1].

Особую опасность для экосистемы Байкала представляют стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ), включенные в список Стокгольмской конвенции [2], распространение которых в биосфере имеет глобальный характер.

Согласно Стокгольмской конвенции производство и использование СОЗ должно быть прекращено, а имеющиеся запасы и отходы, содержащие эти соединения, ликвидированы. Особое внимание в настоящее время уделяется полихлорированным бифенилам (ПХБ): к 2025 г. должно быть выведено из эксплуатации промышленное оборудование, содержащее ПХБ, а к 2028 г. уничтожены запасы ПХБ [2].

ПХБ входят в группу стойких органических загрязнителей, обладающих высокой токсичностью, способностью к переносу на дальние расстояния и высоким потенциалом биоаккумуляции [3]. ПХБ являются ксенобиотиками — чужеродными природной среде химическими веществами. Конгенеры бифенилов присутствуют во всех природных компонентах, включая атмосферный воздух, почву, воду, донные отложения, растения, а также в организмах животных и людей. Особенностью СОЗ является их способность оказывать неблагоприятное воздействие на живые организмы даже на уровне низких концентраций. Соединения этой группы способны длительно сохраняться в окружающей среде и накапливаться в пищевых цепях. Например, по мнению исследователей из Японии [4], повышенные концентрации СОЗ в организме нерп стали причиной снижения иммунитета, что вызвало эпидемию среди нерп и их массовую гибель от чумки плотоядной в 1987—1988 гг. Местное население традиционно использует в пищу мясо и жир нерпы. Известно, что потребление мяса и жира водных млекопитающих при высоких концентрациях ПХБ может приводить к повышенной токсичной нагрузке на местное население. Уровни ПХБ в грудном молоке жителей пос. Онгурен Иркутской области сравнимы с концентрациями, найденными у жителей г. Серпухова Московской области, работавших на трансформаторном заводе, где в производстве использовался Совол (техническая смесь ПХБ) в начале 1990-х гг. [4].

На побережье Южного Байкала расположена промышленная площадка ныне закрытого Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). Это крупнейший в центральной экологической зоне Байкальской природной территории источник накопленного вреда, деятельность которого на протяжении десятилетий была связана с поступлением в экосистему озера Байкал соединений группы ПХБ. Влияние прошлой деятельности БЦБК на окружающую среду как источника поступления ПХБ до настоящего времени изучена не полностью.

Существует тесная взаимосвязь между содержанием загрязняющих веществ в атмосфере и в поверхностном почвенном слое [5—7]. Основными процессами, способствующими воздушно-почвенному обмену ПХБ, являются сухое и влажное осаждение, а также испарение из почвы [8]. Совокупность и интенсивность этих процессов, обусловленных химическими и физическими свойствами веществ, в сочетании с различными параметрами почвы и воздуха (например, температурой) определяют масштабы и направление переноса [9, 10].

Учитывая, что почвы являются основным резервуаром накопления СОЗ, обмен и распределение ПХБ между сопредельными с почвой природными средами являются ключевыми процессами, контролирующими судьбу и перенос ПХБ в региональном и глобальном масштабах в условиях климатических изменений.

Целью данной работы является исследование геоэкологических процессов распределения и переноса ПХБ в сопредельных средах (почва–воздух) в районе потенциального локального источника поступления этих соединений в окружающую среду — промплощадки БЦБК вблизи г. Байкальска. Результаты получены на основе данных мониторинга за содержанием ПХБ в воздухе и почве в период 2021—2023 гг. Это послужило основой для анализа временной динамики содержания ПХБ в воздухе, выявления географических границ площадного локального источника поступления ПХБ в атмосферный воздух и направления потоков переноса ПХБ в системе почва–атмосферный воздух в зависимости от сезонных факторов.

Район, объекты и методы исследования

Географическое положение и климатические особенности. Район исследований общей площадью около 80 км² включал территории, примыкающие к промплощадке БЦБК, в том числе г. Байкальск. Отдельные пробы почв были отобраны вблизи шламохранилищ на Бабхинском и Солзанском полигонах (рис. 1).

Район обследований расположен на южном побережье озера Байкал на склоне хребта Хабар-Дабана низко- и среднегорного округа Восточно-Саянской котловинно-горной почвенной провинции. В пределах котловины Байкала его водная масса смягчает климат, в результате летом в пределах озерной котловины воздух на 6—8 °С холоднее, а поздней осенью и в начале зимы на 5—15 °С теплее, чем над окружающей сушей [8]. В период с апреля по октябрь наблюдается повышенное количество осадков на северных и северо-западных склонах хр. Хабар-Дабана. Окружающие Байкал горы трансформируют направление преобладающего в атмосфере Сибири западно-восточного переноса, вследствие чего над поверхностью озера получают развитие ветровые потоки, ориентированные вдоль и поперек озерной котловины. В летний период с мая по октябрь наибольшее значение имеют поперечные западные и северо-западные ветры (повторяемость около 33 %) и продольные юго-западные (около 12 %), а также северо-восточные с западного побережья (около 19 %) [11].

Почвенный покров. По данным [12], основными почвами в районе исследования являются грубогумусовые подбуры. При этом 15—20 % площади территории занимают дерново-подзолы и грубогумусовые буроземы; в 5—10 % случаев почвы представлены подзолами. Характерной особенностью почвообразования в этом регионе является промывной водный режим, обусловленный песчаным характером подстилающих пород, слабое разложение органического вещества, которое выражается в грубогумусном верхнем горизонте и широким диапазоном кислотности почвы. Среднее содержание органического углерода в почвах составляет 4,9 %.

Отбор проб почвы. В 2021—2023 гг. были проведены экспедиционные работы по установлению уровней загрязнений почв на территории г. Байкальска и промплощадки БЦБК. Карта-схема обследуемой территории с указанием точек отбора проб приведена на рис. 1.

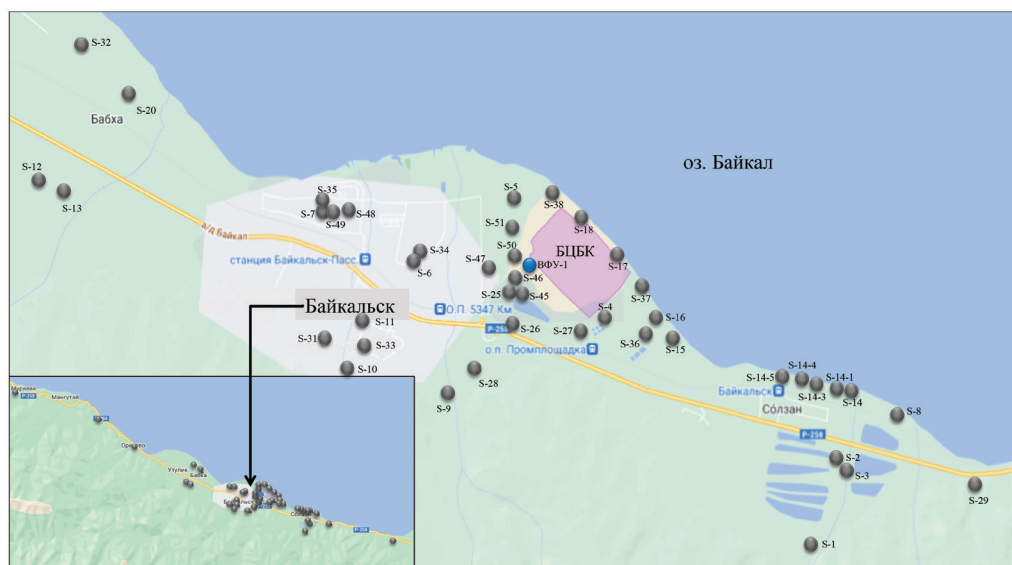


Рис. 1. Карта-схема отбора проб почвы (●) и атмосферного воздуха (●).

Fig. 1. Schematic map sampling of soil (●) and atmospheric air (●).

Для выделения особенностей вертикальной миграции ПХБ в почве и массо-обмена с атмосферой обследуемая территория была ранжирована на:

- 1) Территорию БЦБК (почвы, прилегающие к территории промышленной площадки БЦБК и полигоны захоронения отходов).
- 2) Селитебную территорию (почвы г. Байкальска и его окрестностей, включая фоновые точки).

Точечные пробы отбирали методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 до глубины 20 см так, чтобы каждая проба представляла собой часть почвы, типичной для исследуемых почвенных горизонтов и ключевых участков. Длина стороны квадрата в зависимости от размера участка составляла от 2 до 5—10 м. Точечные пробы одного конверта объединяли в одну и упаковывали в алюминиевую фольгу. Из каждой точки отбирали около 1 кг почвы. Суммарно было отобрано 43 пробы почв, из них 20 проб — в 2021 г., 15 проб — в 2022 г. и 8 проб — в 2023 г.

Для установления вертикального распределения ПХБ в почвенном профиле в двух точках опробования, расположенных в микрорайоне Строитель и территории промплощадки БЦБК, провели отбор проб почв до глубины 20 см послойно с шагом 5 см. Образцы на различных глубинах были собраны из вертикального почвенного разреза с помощью шпателя из нержавеющей стали. Глубину слоя почвы тщательно измеряли с помощью линейки. Такой метод отбора проб имеет преимущество по сравнению с взятием кернов почвы [5], поскольку в процессе отбора керна возможно сжатие профиля почвы, что приводит к искажению результатов измерений вертикального распределения содержания ПХБ в почве.

Атмосферный воздух. Отбор проб атмосферного воздуха проводился с использованием воздухофильтрующей установки (ВФУ) модификации МР-48-02 производства ФГБУ «НПО «Тайфун» на соответствующие аэрозольные фильтры TFAG41 и последовательно установленные сорбенты PUF. ВФУ размещена на метеорологической станции в г. Байкальске (51.5156° с. ш., 104.17475° в. д.) (рис. 1). Отбор проб сопровождался метеорологическими наблюдениями, включающими измерения температуры воздуха и почвы, скорости и направления ветра.

Длительность отбора каждой пробы составляла около 7 суток, объем каждой пробы 4000–5000 м³. Отбор проб проводился в круглосуточном режиме в первую и третью неделю каждого месяца. Всего в период с 24.11.2021 г. по 28.12.2022 г. было отобрано 29 проб атмосферного воздуха. Особенность проведения наблюдений за ПХБ в атмосферном воздухе состоит в том, что продолжительность отбора одной пробы атмосферного воздуха составляет несколько суток.

Методы анализа. Инструментальный анализ ПХБ выполнялся на хромато-масс-спектрометре высокого разрешения Agilent 7200 Q-TOF в режиме ионизации электронами в аккредитованной лаборатории Научно-производственного объединения «Тайфун» (г. Обнинск). Пробоподготовка образцов компонентов окружающей среды определялась в полном соответствии с методикой [13]. Для контроля работы прибора в качестве внутреннего стандарта использовался ПХБ-155. Разделение аналитов выполнялось на кварцевой капиллярной колонке DB-5MS. Идентификация индивидуальных конгенов ПХБ проводилась по наличию характеристических ионов и совпадению времен удерживания выделенных на масс-хроматограмме пиков с временами удерживания конгенов ПХБ, полученных при анализе контрольной смеси.

Используемый аналитический метод позволил максимально достоверно идентифицировать аналиты. В пробах почв определяли 58 индивидуальных конгенов ПХБ, в пробах воздуха — 63 конгенера ПХБ. В настоящей работе детально рассмотрено поведение лишь некоторых бифенилов (табл. 1), включая шесть индикаторных ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153 и 180), чьи концентрации в воздухе и почве были надежно измерены количественно. Перечень исследованных ПХБ включал ди-, три-, тетра-, пента-, гекса- гепта- и октахлорзамещенные конгенеры. Физико-химические свойства подробно изученных конгенов ПХБ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства исследованных конгенов ПХБ

Physico-chemical properties of the studied PCB congeners

Наименование вещества	CAS № [14]	Молярная масса, г/моль [14]	Log K _{OA} [15—18]	Давление пара (25 °C), Па [19]
ПХБ-28	7012-37-5	257,543	Log K _{OA} = 4102/T—5,91 [15]	0,0277
ПХБ-44	41464-39-5	291,988	Log K _{OA} = 4340/T—6,20 [16]	0,0147
ПХБ-52	35693-99-3	291,988	Log K _{OA} = 4340/T—6,20 [16]	0,00497
ПХБ-66	32598-10-0	291,988	Log K _{OA} = 3827/T—3,82 [17]	0,00459
ПХБ-87	38380-02-8	326,433	Log K _{OA} = 9,25 [18]	0,00141
ПХБ-101	37680-73-2	326,433	Log K _{OA} = 4291/T—5,50 [15]	0,00358

Наименование вещества	CAS № [14]	Молярная масса, г/моль [14]	Log K _{OA} [15—18]	Давление пара (25 °C), Па [19]
ПХБ-105	32598-14-4	326,433	Log K _{OA} = 4678/T—5,68 [17]	0,00124
ПХБ-118	31508-00-6	326,433	Log K _{OA} = 4693/T—5,92 [17]	0,000167
ПХБ-138	35065-28-2	360,878	Log K _{OA} = 4584/T—5,57 [17]	0,000487
ПХБ-153	35065-27-1	360,878	Log K _{OA} = 4696/T—6,02 [17]	0,000457
ПХБ-170	35065-30-6	395,323	Log K _{OA} = 10,69 [18]	0,000372
ПХБ-180	35065-29-3	395,323	Log K _{OA} = 4535/T—4,70 [17]	0,000506
ПХБ-187	52663-68-0	395,323	Log K _{OA} = 4490/T—5,20 [16]	0,000598

Зависимость концентрации суммы исследованных конгенов ($\Sigma\text{ПХБ}_{13}$) от общей концентрации ПХБ ($\Sigma\text{ПХБ}$) имеет линейный характер и характеризуется высокими коэффициентами корреляции 0,992 (почва) и 0,997 (воздух) (рис. 2). Это подтверждает постоянство состава конгенов ПХБ в системе и представительность выборки 13 конгенов для оценивания закономерностей поведения всей группы соединений. Некоторое различие в углах наклона прямых на рис. 2 может быть объяснено тем фактором, что состав конгенов ПХБ разной степени хлорирования в почве и в атмосферном воздухе различается [20].

Внутри групп конгенов ПХБ близкой степени хлорирования наблюдается очень высокая корреляция. Конгены различной степени хлорирования

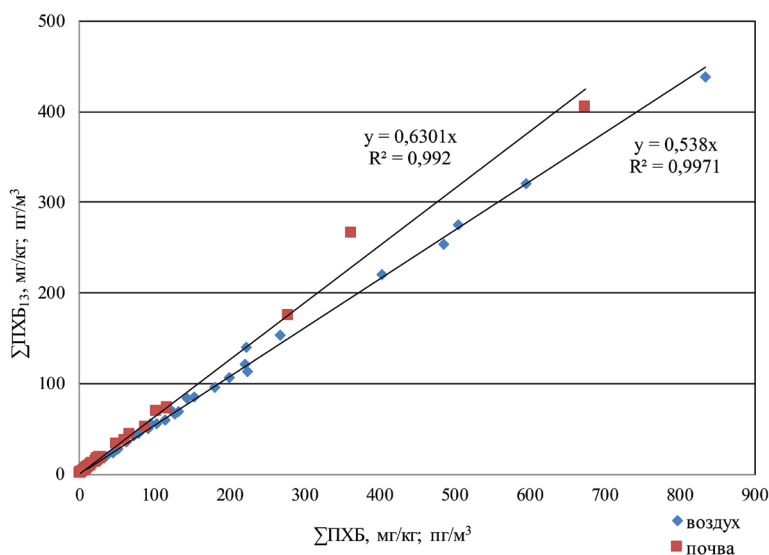


Рис. 2. Зависимость концентраций суммы конгенов $\Sigma\text{ПХБ}_{13}$ от $\Sigma\text{ПХБ}$ в атмосферном воздухе и в почве.

Fig. 2. The dependence of the concentrations of the sum of congeners ΣPCB_{13} on ΣPCBs in atmospheric air and in soils.

коррелированы значительно слабее. Так, коэффициенты корреляции три- и тетрахлорзамещенных конгенов ПХБ-28, 44, 52, 66 и гептахлорированных конгенов ПХБ-170, 180 составляет менее 0,5, но внутри групп коэффициенты корреляции составляют 0,7—0,9.

Массовая доля органического углерода в почвах ($C_{\text{орг}}$) определялась методом мокрого сжигания по ГОСТ 26213-91.

Расчет долей фугитивностей конгенов ПХБ. Для описания поведения (распределения и направлений переноса) микропримесей гидрофобных загрязняющих веществ в окружающей среде, например, между почвой и атмосферой, широко используется концепция (модель) фугитивности, предложенная МакКеем [14]. Фугитивность связана с концентрацией и является количественным физико-химическим параметром, характеризующим потенциал переноса вещества из одного компартмента (компонента окружающей среды) в другой. Расчет и сравнение фугитивностей на основе имеющихся данных наблюдений (концентраций) позволяет характеризовать состояние равновесия и направление переноса в окружающей среде [21]. Химические вещества имеют тенденцию переходить из природной среды, где они обладают высокой фугитивностью, в сопредельную, где фугитивность меньше [22].

Оценку отклонения распределения конгенов ПХБ в системе почва–атмосферный воздух от состояния равновесия проводился на основе показателя доли фугитивности (ff) соединения [5, 21—25], который определяется выражением:

$$ff = f_s / (f_s + f_a), \quad (1)$$

где f_s — фугитивность соединения в почве; f_a — фугитивность соединения в атмосферном воздухе. Если значение $ff = 0,5$, то наблюдается равновесие. При $ff > 0,5$ происходит поступление соединения из почвы в воздух, при $ff < 0,5$ наблюдается осаждение ПХБ из атмосферы в почву.

Учитывая существенную неопределённость при расчете фугитивности соединения как в почве, так и в воздухе, на практике считают, что при $ff < 0,3$ происходит преобладание процессов осаждения над испарением. При $ff > 0,7$ испарение преобладает над осаждением. Если доля фугитивности варьируется в диапазоне от 0,3 до 0,7, то это состояние в системе рассматривается как равновесное [23, 24, 26].

Фугитивность химического вещества в каждом конкретном компартменте рассчитывается исходя из концентрации C (г/м³) по формуле [21]:

$$f = C / (Z \times M), \quad (2)$$

где M — молекулярная масса (г/моль), а Z (Z -значение) — ёмкость фугитивности химического вещества в компартменте (моль/(Па×м³)).

Ёмкость фугитивности исследуемого вещества в воздухе Z_a вычисляется по формуле:

$$Z_a = (R \times T)^{-1}, \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная (Па×м³)/(моль×К); T — температура воздуха в К.

Ёмкость фугитивности исследуемого вещества в почве Z_s рассчитывается согласно выражению:

$$Z_a = (f_{oc} \times p_s \times 0,411 K_{oa}) / R \times T, \quad (4)$$

где f_{oc} — концентрация органического углерода (г/кг), p_s — плотность почвы (кг/дм³), K_{oa} — коэффициент распределения октанол / воздух, 0,411 — эмпирический коэффициент [27—29].

Зависящие от температуры коэффициенты распределения октанол / воздух были оценены на основании литературных данных с использованием параметров регрессии ($\text{Log } K_{oa} = A + B/T$), приведенных в таблице 1.

Результаты исследований

Внутригодовой ход концентраций ПХБ в атмосферном воздухе. Концентрации индивидуальных конгенов и Σ ПХБ в атмосферном воздухе в период с ноября 2021 г. по декабрь 2022 г. варьировались в широком диапазоне, причем их изменение носило отчетливый сезонный характер. В теплый период концентрации ПХБ существенно возрастали по сравнению с холодным (рис. 3). Подобная

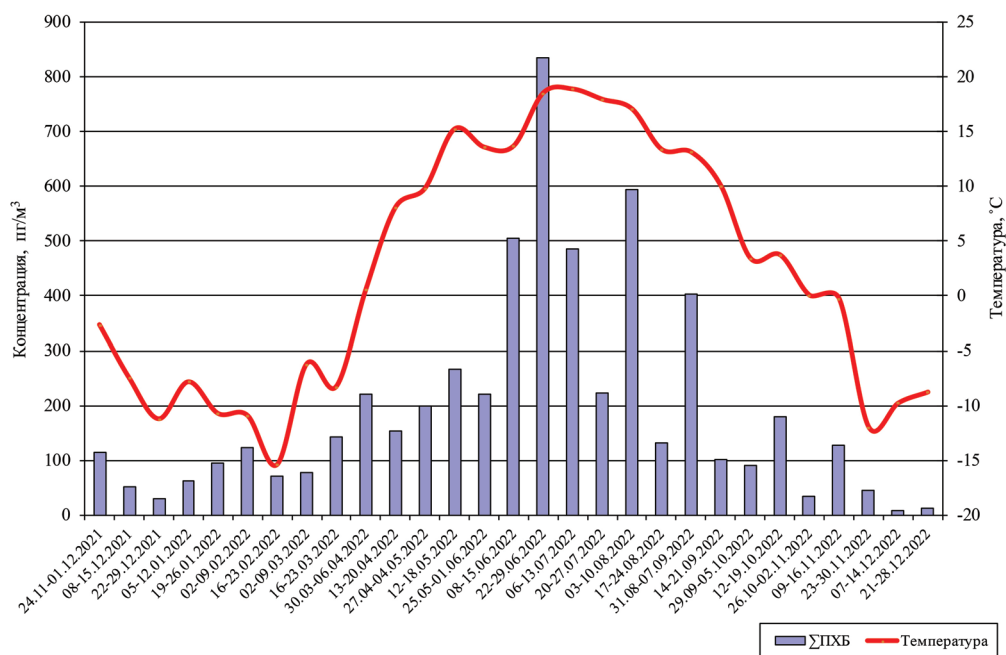


Рис. 3. Временной ход температуры почвы и концентраций Σ ПХБ в воздухе на метеостанции г. Байкальска.

Fig. 3. Time course of soil temperature and PCBs concentrations in the air at the weather station in Baikalsk.

зависимость концентраций ПХБ от температуры наблюдается независимо от географического положения станций наблюдений, причем как в фоновых районах, так и в районах с техногенным воздействием [24, 25].

Интерпретация этой зависимости основана на предположении, что в весенне-летний период с ростом температуры воздуха возрастает роль вторичных источников поступления ПХБ, связанных с улетучиванием их из почвы в атмосферный воздух [30].

В населенных пунктах, расположенных на южном побережье оз. Байкал (рис. 4), средние значения концентраций Σ ПХБ в воздухе составили:

- г. Байкальск в 2022 г. (193 пг/м^3);
- р.п. Култук в 2014 г. (182 пг/м^3);
- пгт. Танхой в 2016 г. (142 пг/м^3).

На противоположном берегу оз. Байкал в н.п. Листвянка уровни концентраций Σ ПХБ в 2013—2014 гг. составляли 66,6 пг/м^3 , что примерно в 3 раза меньше по сравнению с г. Байкальском [31].

Концентрации ПХБ в городах Дальнего Востока (Владивосток, Хабаровск), полученные авторами [32] в 2011—2012 гг. с использованием пассивных пробоотборников вполне сопоставимы с данными, полученными в Байкальске (рис. 4). В крупном промышленном городе Иркутске концентрации Σ ПХБ в воздухе в 1,4 раза отличались от полученных нами результатов в меньшую сторону. В СНТ

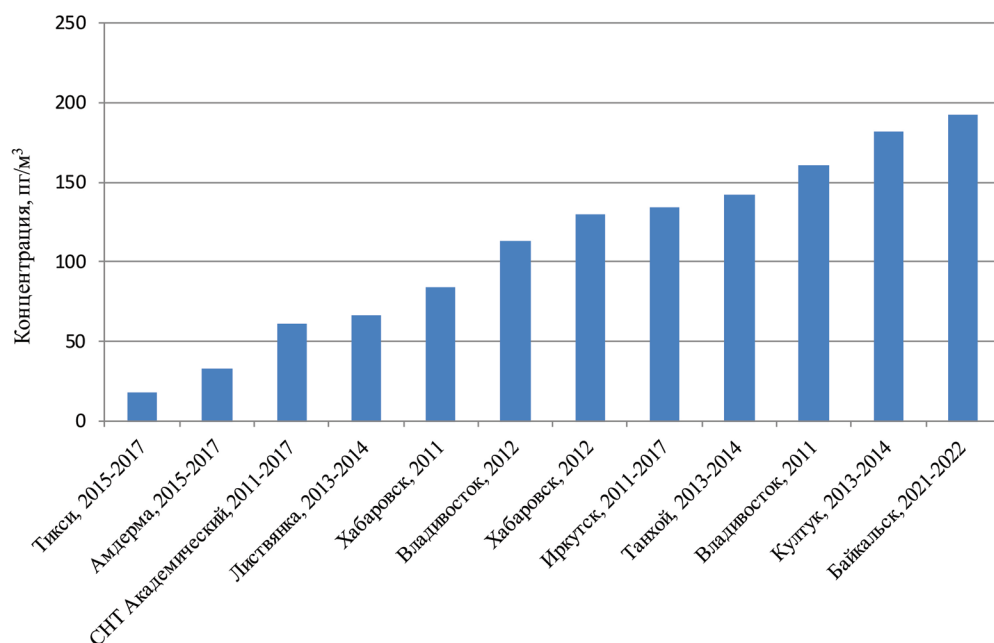


Рис. 4. Содержание Σ ПХБ в атмосферном воздухе разных населенных пунктах.

Fig. 4. Concentrations of Σ PCBs in the atmospheric air of different localities.

Академический, расположенном в 20 км с подветренной стороны от Иркутска на высоте 670 м над уровнем моря, среднее содержание Σ ПХБ находилось на уровне 61 пг/м³ [32].

Отметим, что наблюдаемые в г. Байкальске в 2022 г. среднегодовые концентрации Σ ПХБ превышают фоновые уровни, измеренные в 2015—2017 гг. в Российской Арктике (станции Тикси и Амдерма) в 10 и 6 раз, соответственно [33].

Таким образом, исследуемый район по уровню содержания ПХБ в атмосферном воздухе можно отнести к районам, подверженным воздействию техногенных выбросов, характерных для крупных промышленных городов. Учитывая, что население г. Байкальска по состоянию на 2023 год составляет около 13 тыс. человек [34], а также практически полное отсутствие промышленного производства в городе, то для объяснения таких уровней содержания ПХБ логично предположить влияние достаточно интенсивного локального источника поступления соединений группы ПХБ, которым с наибольшей вероятностью является промплощадка БЦБК.

Уровни содержания и вертикальное распределение ПХБ в почве. ПХБ были количественно определены во всех отобранных пробах почв. В таблице 2 приведены обобщенные данные об уровнях содержания конгенеров ПХБ, а также органического углерода (диапазоны, средние и медианные значения концентраций) в пробах почв в период 2021—2023 гг.

Таблица 2

Диапазон, средние и медианные значения концентраций ПХБ
и органического углерода в отобранных пробах почв
Range, average and median concentrations of PCBs
and organic carbon in selected soil samples

Наименование вещества	Диапазон, мкг/кг	Среднее, мкг/кг	Медиана, мкг/кг	ОДК [35], мкг/кг
ПХБ-28	0,005—6,33	0,25	0,05	1,0
ПХБ-44	0,005—2,20	0,32	0,09	—
ПХБ-52	0,02—8,98	1,04	0,20	1,0
ПХБ-66	0,01—3,60	0,53	0,17	—
ПХБ-87	0,03—12,9	1,22	0,33	—
ПХБ-101	0,06—30,9	3,85	0,76	4,0
ПХБ-105	0,005—20,2	2,57	0,61	—
ПХБ-118	0,07—44,0	5,47	1,26	4,0
ПХБ-138	0,14—78,8	7,21	1,99	4,0
ПХБ-153	0,06—82,1	6,13	1,46	4,0
ПХБ-170	0,005—28,6	1,52	0,28	—
ПХБ-180	0,005—79,4	2,73	0,37	4,0
ПХБ-187	0,005—42,6	1,50	0,18	—
Σ ПХБ ₆	0,38—266	21,1	4,61	—
Σ ПХБ	0,98—674	52,6	12,8	20,0
$C_{орг}$, мг/кг	10,4—117	49,0	49,9	—

Экспериментальные данные по исследованию уровней содержания ПХБ в почвах подтверждают сделанное выше предположение о наличии локального источника выбросов ПХБ вблизи г. Байкальска. Фактически измеренные уровни концентраций Σ ПХБ в пробах почв находятся в диапазоне от 0,98 до 674 мкг/кг сухого веса, что сопоставимо с концентрациями, ранее обнаруженными на территории г. Усолье-Сибирское (Иркутской обл.), где расположен химический комбинат «Усольхимпром» (Σ ПХБ от 0,92 до 530 мкг/кг) [36], а также на территориях металлургических заводов и районах демонтажей судов в Турции (Σ ПХБ варьирует от 0,3 до 461 мкг/кг) [37].

В то же время измеренные значения концентраций Σ ПХБ были ниже по сравнению с территорией хранения устаревших трансформаторов в Республике Беларусь, где концентрации Σ ПХБ достигали 7690 мкг/кг [38] или по сравнению с промзоной района «Метрогородок» (восточный административный округ г. Москвы), где максимальные концентрации достигали 4592 мкг/кг [39].

Концентрации шести индикаторных ПХБ в исследованных пробах почвы г. Байкальска изменялись от 0,38 до 266 мкг/кг сухого веса (табл. 2). Средние значения суммы индикаторных ПХБ в фоновых точках обследуемой территории (1,38 мкг/кг) были значительно ниже обнаруженных в селитебной зоне (Σ ПХБ₆ = 13,5 мкг/кг) и на территории промплощадки БЦБК (Σ ПХБ₆ = 32,0 мкг/кг).

Максимальные концентрации Σ ПХБ₆, зафиксированные вблизи шламонакопителя, были выше в 2,6 раза по сравнению с обнаруженными на территории г. Усолье-Сибирское (Σ ПХБ₆ – до 100 мкг/кг) [36, 40] и в 1,5 раза выше, чем в Южном Китае на территории, где в 1989 г. произошла разгерметизация конденсатора, а уровни индикаторных ПХБ в 2003 г. составляли 175 мкг/г [41].

Средние концентрации Σ ПХБ₆ селитебной территории г. Байкальска находятся на одном уровне со средними значениями проб почв, отобранных в г. Хабаровске в 2010–2012 гг. (Σ ПХБ₆ = 11,9 мкг/кг) [42]. Концентрации Σ ПХБ в почвах фоновых районов южного побережья Байкала (3,70 мкг/кг) не превышают средних значений аналогичных районов в мире (5,41 мкг/кг) [26].

Отметим, что для корректного сравнения измеренных в литературе уровней содержания ПХБ в почвах необходимо учитывать используемую методику определения, конгенерный состав ПХБ для расчета их суммарного содержания, глубину отбора проб почв. Если сравнивать измеренные концентрации ПХБ с гигиеническими нормативами для почвы [35], то в 17-и пробах наблюдалось превышение ОДК суммы ПХБ. Максимальное значение суммы ПХБ (33,7 ОДК в 2022 г.) было зафиксировано на территории промышленной площадки БЦБК вблизи временно-го шламонакопителя.

Обнаружено также превышение допустимых концентраций индивидуальных нормируемых конгенов ПХБ. Для ПХБ-28 среднее содержание в проанализированных пробах и наблюдавшийся максимум составляли 0,25 и 6,3 ОДК соответственно, ПХБ-52 — 1,0 и 9,0 ОДК, ПХБ-101 — 0,96 и 7,7 ОДК, ПХБ-118 — 1,4 и 11 ОДК, ПХБ-138 — 1,8 и 19,7 ОДК, ПХБ-153 — 1,5 и 20,5 ОДК, ПХБ-180 — 0,7 и 19,9 ОДК. Отметим, что вклад рассматриваемых конгенов ПХБ составлял от 56 до 75 % (по массе) от суммы всех ПХБ.

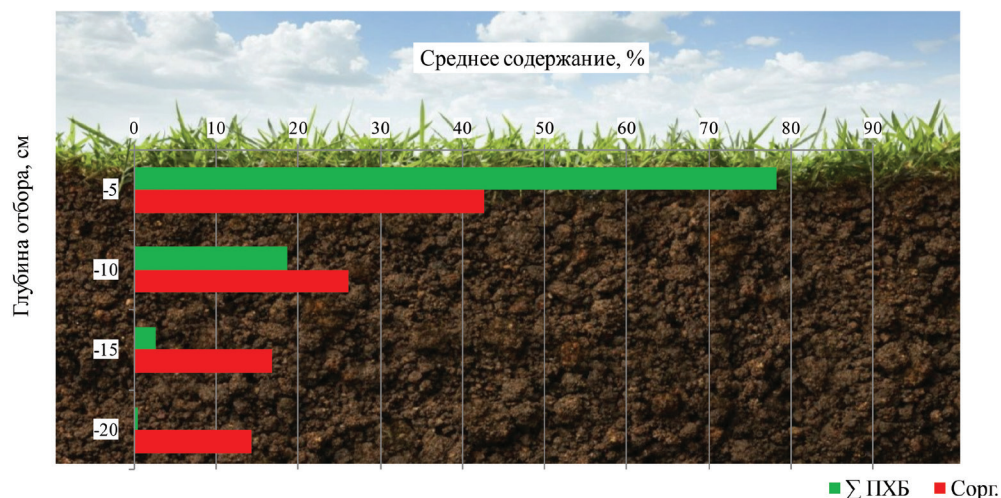


Рис. 5. Вертикальный профиль загрязнения почв конгенерами ПХБ на территории г. Байкальска.

Fig. 5. Vertical profile of soil contamination by PCB congeners in the territory of Baikalsk.

При изучении вертикального распределения определяемых веществ (рис. 5), оказалось, что в верхнем слое 0—10 см содержится 97 % Σ ПХБ и 68,8 % органического углерода. На глубине от 10 до 15 см обнаружено 2,6 % Σ ПХБ и около 16,9 % $C_{\text{орг}}$, на долю горизонта 15—20 см приходилось менее 0,5 % Σ ПХБ и 14,3 % $C_{\text{орг}}$. Для расчета долей фугитивности с учетом неоднородности вертикального распределения конгенов ПХБ в почве их массовые концентрации в слое 0—20 см были пересчитаны и приведены к толщине слоя 0—10 см.

Ключевую роль в поглощении токсичных загрязняющих веществ гидрофобной природы играет органический углерод почв. Содержание органического вещества является важным фактором для сорбции органических соединений [8, 28, 43]. Некоторые авторы [24] отмечают высокую пространственную корреляцию уровней содержания ПХБ и органического углерода почв.

По полученным экспериментальным данным значимой пространственной корреляции между содержанием ПХБ и органического углерода в почве на всей обследуемой территории обнаружено не было, что свидетельствует о техногенной природе формирования загрязнения почв ПХБ.

Географическое положение и пространственные размеры источника загрязнения почв ПХБ. Для определения размеров потенциального источника поступления ПХБ было рассмотрено распределение по площади уровней концентраций конгенов ПХБ в почве. Одновременно с этим для оценки направления переноса в системе почва—атмосферный воздух в каждой точке опробования использовали показатель доли фугитивности, рассчитанный по формуле (1).

Были рассчитаны статистические параметры массивов данных обеих территорий, которые показали смешанный характер статистического распределения,

который отличается от нормального. Рассчитанные величины средних и медианных концентраций конгенов и суммы ПХБ обеих территорий существенно различаются (табл. 3). Для подтверждения статистически значимого различия массивов данных использовали непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Как следует из данных таблицы 3, для всех конгенов ПХБ, кроме ПХБ 28, 44 и 170, вклад которых по массе с Σ ПХБ не превышает 5 %, наблюдаются статистически значимые различия массивов данных при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 3

Диапазон и статистические параметры ПХБ в почвах
на промплощадке БЦБК и в селитебной зоне г. Байкальска

Range and statistical parameters PCB observations
in soils at the BPPM industrial site and in the residential area of Baikal'sk

Наименование вещества	Территория БЦБК		Селитебная территория		U критерий Манна-Уитни		
	Диапазон, мкг/кг	Среднее (медиана), мкг/кг	Диапазон, мкг/кг	Среднее (медиана), мкг/кг	Z	p-level	Значимость различий на уровне 0,05
ПХБ-28	0,01—6,33	0,10 (0,05)	0,01—0,20	0,05 (0,03)	1,20	0,228	—
ПХБ-44	0,01—2,20	0,31 (0,08)	0,01—0,57	0,10 (0,03)	1,77	0,077	—
ПХБ-52	0,03—8,98	1,43 (0,43)	0,02—3,19	0,43 (0,13)	2,34	0,019	+
ПХБ-66	0,04—3,6	0,70 (0,24)	0,01—1,53	0,26 (0,08)	2,59	0,010	+
ПХБ-87	0,03—12,0	1,73 (0,64)	0,03—3,11	0,43 (0,14)	2,94	0,003	+
ПХБ-101	0,07—30,9	5,57 (1,70)	0,06—9,35	1,20 (0,36)	3,03	0,002	+
ПХБ-105	0,03—20,2	3,59 (0,97)	0,01—6,64	0,85 (0,23)	2,83	0,005	+
ПХБ-118	0,10—44,0	7,82 (2,03)	0,07—14,5	1,85 (0,44)	2,88	0,004	+
ПХБ-138	0,14—78,8	10,6 (2,69)	0,14—16,6	2,03 (0,62)	3,02	0,003	+
ПХБ-153	0,06—82,1	9,01 (2,26)	0,08—14,3	1,69 (0,61)	2,55	0,011	+
ПХБ-170	0,01—28,6	1,74 (0,27)	0,01—1,19	0,20 (0,07)	1,85	0,064	—
ПХБ-180	0,01—79,4	4,19 (0,43)	0,01—1,75	0,34 (0,17)	2,49	0,013	+
ПХБ-187	0,01—42,6	2,08 (0,19)	0,01—0,71	0,16 (0,09)	2,34	0,019	+
Σ ПХБ	1,01—674,2	76,6 (21,8)	0,98—116,5	15,6 (4,84)	2,83	0,005	+

Для расчета долей фугитивностей использовано значение фугитивности в конкретной точке почвы и значение фугитивности в воздухе, рассчитанное для конкретного конгенера ПХБ с использованием медианной концентрации в воздухе за теплый период 2022 г. (апрель-октябрь).

По результатам расчетов установлено, что семь проб почвы (S-4, S-7, S-13, S-18, S-19, S-25 и S-39) являются очевидными источниками поступления всех рассматриваемых индивидуальных конгенов ПХБ в окружающий воздух ($ff > 0,7$). Еще тринадцать проб (S-2, S-11, S-16, S-17, S-26, S-27, S-33, S-35–S-37, S-47, S-50 и S-51) также являются источниками загрязнения атмосферы некоторыми ПХБ, а средняя доля фугитивностей варьируется от 0,7 до 0,8. Незначительные точечные источники поступления были зафиксированы в микрорайонах «Южный» и «Строитель» города Байкальска, а также на Бабхинском и Солзанском полигонах шламонакопителей (рис. 6). Основная часть проб, доля

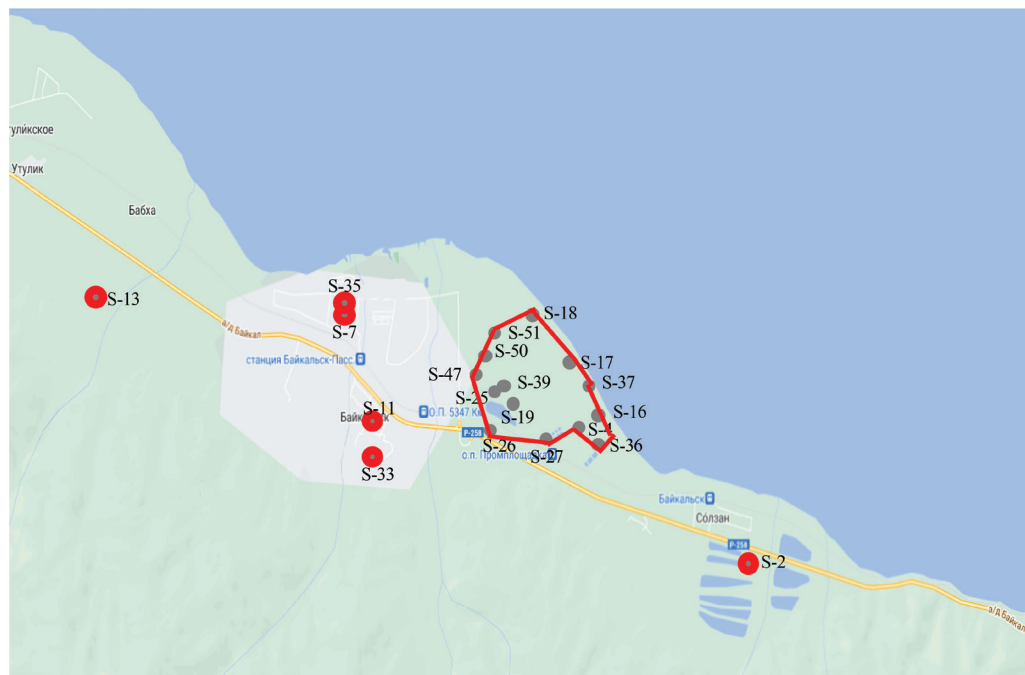


Рис. 6. Карта-схема загрязнения почв в г. Байкальске конгенерами ПХБ.

Fig. 6. Schematic map of soil pollution in the city of Baikalsk by PCB congeners.

фугитивности которых $ff \geq 0,7$, расположена на территории, непосредственно прилегающей к БЦБК.

Зная оценки фугитивности $ff \geq 0,7$, несложно получить границы территории, внутри которой почва загрязнена так, что она является источником поступления конгенов ПХБ в воздух за счет испарения (рис. 6). Внутри этой территории попадает промплощадка Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, площадь которой составляет 1,16 км².

Общая площадь территории, включая промплощадку БЦБК, с поверхности которой происходит испарение ПХБ, может быть оценена величиной 2,7 км². Плотность загрязнения почвы ПХБ на этой территории оценена по медианной концентрации Σ ПХБ 21,8 мкг/кг (табл. 3) в предположении, что весь запас ПХБ сосредоточен в верхнем 10 см слое почвы. Плотность загрязнения почвы ПХБ составила 0,013 г/м².

Достаточно показательно сравнение долей фугитивности конгенов ПХБ различной степени хлорирования, полученных при расчете в двух группах почв. Как следует из рис. 7, с увеличением доли хлорирования конгенов ПХБ наблюдается снижение доли фугитивности и, соответственно, снижается вклад конгенов высокой степени хлорирования в атмосферный перенос в составе суммы ПХБ. С точки зрения физических процессов этот процесс вполне понятен,

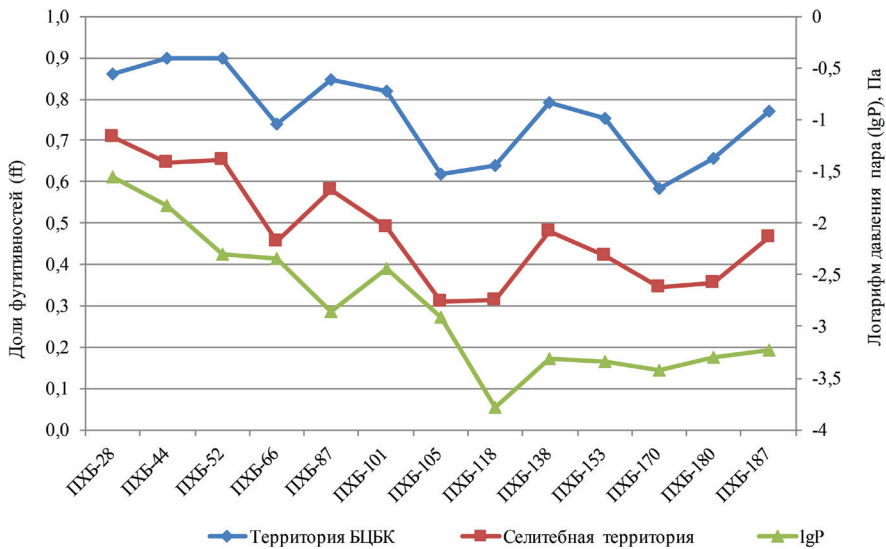


Рис. 7. Сравнение средних значений долей фугитивности (ff) и давления пара (P) для конгенов ПХБ.

Fig. 7. Comparison of the average values of the fractions of fugacity (ff) and vapor pressure (P) for PCB congeners.

поскольку при прочих равных условиях давление пара конгенов ПХБ снижается примерно на порядок с появлением дополнительного атома хлора в молекуле (табл. 1, рис. 7). Коэффициенты корреляции между средними значениями долей фугитивности и давления пара для конгенов ПХБ разной степени хлорирования для территории БЦБК и селитебной территории г. Байкальска составили, соответственно, $r = 0,50$ и $0,67$.

Сезонный характер распределения и переноса конгенов ПХБ в системе почва–атмосфера. Для оценки сезонного фактора проведены расчеты долей фугитивности для зимнего, весеннего, летнего и осеннего сезонов 2021—2022 гг. с использованием концентраций ПХБ в воздухе, измеренных в эти периоды, и концентраций ПХБ в почве, измеренных летом 2021—2023 гг.

Учитывая стойкость к окружающей среде, концентрации ПХБ в почве за период исследований могут быть приняты неизменными. Это предположение было подтверждено недавними исследованиями авторов [44], в которых ежемесячно измерялись концентрации ПХБ в почве в регионе Измир (Турция) в течение одного года и сообщаемый о стандартных отклонениях в размере около 30 % для ПХБ.

Из полученных результатов следует (рис. 8), что для всех конгенов ПХБ в течение года преобладает испарение с поверхности земли (65 % от общего числа проб), тенденция к осаждению ПХБ из атмосферы наблюдалась в 15 % случаев, в 20 % случаев ПХБ находились в состоянии равновесия. В теплый период года с апреля по октябрь результаты расчетов демонстрируют доминирование

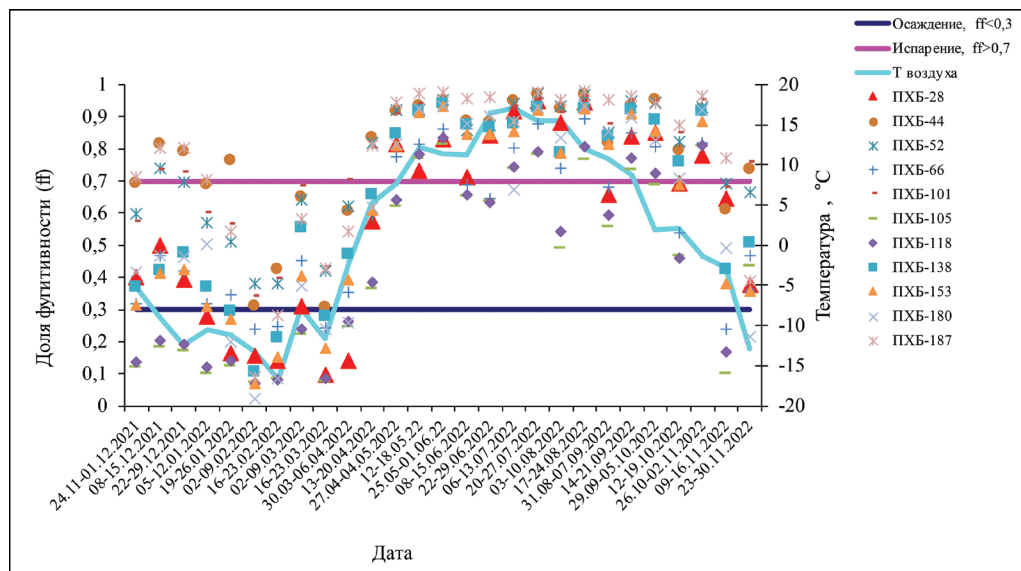


Рис. 8. Внутригодовая изменчивость долей фугитивности конгенов ПХБ на МС Байкальск за период наблюдений 2021—2022 гг.

Fig. 8. Intra-annual variability of the proportion of fugitivity of PCB congeners at MS Baikalsk during the observation period 2021—2022.

процессов испарения (93,4 % от общего числа проб), в оставшихся случаях состояние системы близко к равновесию. Значения долей фугитивности, характерные для осаждения в теплый период года, не наблюдаются. С наступлением отрицательных температур и установлением снежного покрова на поверхности земли система переходит в состояние равновесия или происходит осаждение ПХБ из атмосферы на подстилающую поверхность.

Проведенные расчеты подтверждают, что низкохлорированные конгенеры ПХБ (например, ПХБ-28 и ПХБ-52) проявляют большую склонность к испарению по сравнению с более тяжелыми (например, ПХБ-153 и ПХБ-180) (рис. 8).

Полученные результаты свидетельствуют о продолжающемся поступлении ПХБ в атмосферный воздух, несмотря на прекращение функционирования БЦБК в 2013 г. Процесс испарения ПХБ с поверхности почвы наиболее интенсивно происходит в весенний, летний и осенний периоды при положительных температурах окружающей среды.

Заключение

На основе данных мониторинга ПХБ в почве и атмосферном воздухе в 2021—2023 гг. установлены направления потоков переноса ПХБ в системе почва–атмосфера. Для всех рассматриваемых конгенов ПХБ в течение года преобладает испарение с поверхности почвы (65 % от общего числа проб воздуха).

Кроме этого, загрязнение воздуха ПХБ имеет выраженный сезонный характер. В теплый период года с апреля по октябрь результаты расчетов демонстрируют доминирование процессов испарения (93,4 % от общего числа проб воздуха) ПХБ из почвы, в холодный период состояние системы близко к равновесию. Значения долей фугитивности, характерные для осаждения в теплый период года, зимой не наблюдаются.

Обнаружен и исследован неорганизованный источник загрязнения окружающей среды ПХБ в районе г. Байкальска, расположенный вокруг территории промплощадки ныне не действующего БЦБК, а также установлены локальные участки с повышенными уровнями содержания ПХБ в районах полигонов отходов.

С использованием статистических методов и концепции фугитивности оценены географическое положение и пространственные размеры территории, являющейся источником поступления ПХБ в атмосферный воздух. Площадь территории и плотность загрязнения поверхности почвы ПХБ на ней, составили 2,7 км² и 0,013 г/м², соответственно.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2020 году». Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2021. 360 с.
2. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901821036> (дата обращения: 22.03.2024).
3. Wang D. G., Yang M., Jia H. L. et al. Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China // *Chemosphere*. 2008. Vol. 73. P. 38—42. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.055.
4. Кузьмин М. И., Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А. и др. Воздействие сточных вод и атмосферных выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) на озеро Байкал // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2013. Вып. 28. С. 51—57.
5. Cousins I. T., Jones K. C. Air—soil exchange of semi—volatile organic compounds (SOCs) in the UK // *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 102. P. 105—118. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00069-4.
6. Lee R. M., Hung H., Mackay D., Jones K. C. Measurement and modeling of the diurnal cycling of atmospheric PCBs and PAHs // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 32. P. 2172—2179. doi: 10.1021/es980028z.
7. Sweetman A. J., Jones K. C. Declining PCB concentrations in the UK atmosphere: evidence and possible causes // *Environmental Science and Technology*. 2000. Vol. 34. P. 863—869. doi: 10.1021/es9906296.
8. Cousins I. T., Beck A. J., Jones K. C. A review of the processes involved in the exchange of semi—volatile organic compounds (SVOC) across the air—soil interface // *Science of the Total Environment*. 1999. Vol. 228. P. 5—24. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00015-7.
9. Hippelein M., McLachlan M.S. Soil/Air partitioning of semi—volatile organic compounds. 2. Influence of temperature and relative humidity // *Environmental Science and Technology*. 2000. Vol. 34. P. 3521—3526. doi: 10.1021/es991421n.
10. Grundy S. L., Bright D. A., Dushenko W. T., Reimer K. J. Weathering and dispersal of polychlorinated biphenyls from a known source in the Canadian Arctic // *Environmental Science and Technology*. 1996. Vol. 30. P. 2661—2666. doi: 10.1021/es950493l.
11. Байкаловедение. Книга 1. Новосибирск: Наука, 2012. 466 с.
12. Белозерова И. А., Владимиров И. Н., Убугунова В. И. и др. Почвы водоохранной зоны озера Байкал и их использование // *География и природные ресурсы*. 2016. Вып. 5. С. 70—82.
13. EPA Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/8082a.pdf> (дата обращения: 22.03.2024).

14. Mackay D, Shiu W. Y., Ma K.-C., Lee S. C. Handbook of physical—chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2—nd ed. 2006. 1343 p. doi:10.1201/9781420044393.
15. Li N., Wania F., Lei Y. D., Daly G. L. A comprehensive and critical compilation, evaluation, and selection of physical—chemical property data for selected polychlorinated biphenyls // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2003. Vol. 32. P. 1545—1590. doi: 10.1063/1.1562632.
16. Kömp P., McLachlan M.S. Interspecies variability of the plant/air partitioning of polychlorinated biphenyls // *Environmental Science and Technology*. 1997. Vol. 31. P. 2944—2948. doi: 10.1021/es970141+.
17. Harner T., Bidleman T.F. Measurements of octanol-air partition coefficients for polychlorinated biphenyls // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 1996. Vol. 41. P. 895—899. doi: 10.1021/je960097y.
18. Chen J., Xue X., Schramm K.-W. et al. Quantitative structure—property relationships for octanol—air partition coefficients of polychlorinated biphenyls // *Chemosphere*. 2002. Vol. 48. P. 535—544. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00103-0.
19. Burkhard L. P., Armstrong D. E., Andren A. W. Henry's law constants for the polychlorinated biphenyls // *Environmental Science and Technology*. 1985. Vol. 19. P. 590—596. doi: 10.1021/es00137a002.
20. Запечалов М. А., Левшин Д. Г., Лукьянова Н. Н. и др. Загрязнение почв и сопредельных сред прибрежной зоны Южного Байкала токсичными химическими веществами // *Метеорология и гидрология*. 2023. Вып. 4. С. 66—76. doi: 10.52002/0130-2906-2023-4-66-76.
21. Parnis J., Mackay D. Multimedia environmental models: The fugacity approach. Third edition. Publishing House of Boca Raton, 2020. 301 p. doi: 10.1201/9780367809829.
22. Li Y.F., Harner T., Liu L. et al. Polychlorinated biphenyls in global air and soil: distributions, air—soil exchange, and fractionation effect // *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44. P. 2784—2790. doi: 10.1021/es901871e.
23. Harner T., Bidleman T. F., Jantunen L. M. M., Mackay D. Soil-air exchange model of persistent pesticides in the US cotton belt // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2001. Vol. 20. P. 1612—1621. doi: 10.1002/etc.5620200728.
24. Ruzickova P., Klanova J., Cupr P. et al. An assessment of air-soil exchange of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides across Central and Southern Europe // *Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 42. P. 179—185. doi: 10.1021/es071406f.
25. Koblizkova M., Ruzickova P., Cupr P. et al. Soil burdens of persistent organic pollutants: their levels, fate, and risks. Part IV. Quantification of volatilization fluxes of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls from contaminated soil surfaces // *Environmental Science and Technology*. 2009. Vol. 43. P. 3588—3595. doi: 10.1021/es9003944.
26. Meijer S. N., Ockenden W. A., Sweetman A. J. et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // *Environmental Science and Technology*. 2003. Vol. 37. P. 667—672. doi: 10.1021/es025809l.
27. Bidleman T. F., Leone A. D. Soil-air exchange of organochlorine pesticides in the Southern United States // *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 128. P. 49—57. doi: 10.1016/j.envpol.2003.08.034.
28. Karickhoff S. W. Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils // *Chemosphere*. 1981. Vol. 10. P. 833—846. doi: 10.1016/0045-6535(81)90083-7.
29. Hippelein M., McLachlan M. S. Soil-air partitioning of semivolatile organic compounds. 1. Method development and influence of physiochemical properties // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 32. P. 310—316. doi: 10.1021/es9705699.
30. Wania F., Haugen J-E., Mackay D. Temperature Dependence of Atmospheric Concentrations of Semi-volatile Organic Compounds // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 32, №8. P. 1013—1021. doi: 10.1021/es970856c.
31. Самсонов Д. П., Кочетков А. И., Пасынкова Е. П., Запечалов М. А. Содержание стойких органических загрязнителей в компонентах уникальной экологической системы озера Байкал // *Метеорология и гидрология*. 2017. Вып. 5. С. 105—115.
32. Mamontova E. A., Mamontov A. A. Air Monitoring of Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides in Eastern Siberia: Levels, Temporal Trends, and Risk Assessment // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 1—26. doi:10.3390/atmos13121971.
33. Запечалов М. А., Самсонов Д. П., Кочетков А. И. и др. Глобальный атмосферный перенос стойких органических загрязнителей в Арктическую зону Российской Федерации // *Метеорология и гидрология*. 2020. Вып. 9. С. 90—103.

34. Официальный сайт Байкальского муниципального образования Слюдянского района Иркутской области. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gorod-baikalsk.ru/industry-html> (дата обращения: 22.03.2024).
35. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 22.03.2024).
36. Mamontov A., Mamontova E., Tarasova E. et al. Persistent organic pollutants in soil and snow from the Lake Baikal Region, Russia // *Organohalogen compounds*. 2004. Vol. 66. P. 1327—1332.
37. Dumanoglu Y., Altioğlu H., Kara M., Elbir T. Spatial and temporal variation and air—soil exchange of atmospheric PAHs and PCBs in an industrial region // *Atmospheric Pollution Research*. 2012. Vol. 3. P. 435—449. doi: 10.5094/APR.2012.050.
38. Кухарчик Т. И. Полихлорированные бифенилы в Беларуси. Минск: Минсктиппроект, 2006. 264 с.
39. Агапкина Г. И., Ефименко Е. С., Бродский Е. С. и др. Содержание и распределение полихлорированных бифенилов в почвах Москвы // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2011. Вып. 1. С. 39—45.
40. Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка риска (результаты гранта INTAS 2000-00140). Иркутск: Издательство ИГ СО РАН. 2005. 52 с.
41. Zhao X., Zheng M., Zhang B. et al. Evidence for the transfer of polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo—p—dioxins and polychlorinated dibenzofurans from soil into biota // *The Science of Total Environment*. 2006. Vol. 368. №2—3. P. 744—752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.027.
42. Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Левшина С. И. и др. Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды в системе атмосферный воздух—почва на юге Дальнего Востока России // *Метеорология и гидрология*. 2014. Вып. 11. С. 45—55.
43. Leeuwen C. J., Hermens J. L. M. Risk Assessment of Chemicals: an Introduction. Publishing House of Kluwer Academic. 1995. 374 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6102-8.
44. Odabasi M. Department of Environmental Engineering, Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey. 2012. Unpublished results.

References

1. The State report «*O sostoyanii ozera Baykal i mery po yego okhrane v 2020 godu*» = «*On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2020*». Irkutsk: V. B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021: 360 p. (In Russ.).
2. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901821036> (accessed on: 22.03.2024).
3. Wang D. G., Yang M., Jia H. L. et al. Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China. *Chemosphere*. 2008; (73): 38—42. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.055.
4. Kuzmin M. I., Tarasova E. N., Mamontova E. A., et al. The impact of sewage and atmospheric emissions of Baikal'sk pulp and paper mill (PPPM) on lake Baikal. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013; (28): (51—57). (In Russ.).
5. Cousins I. T., Jones K. C. Air-soil exchange of semi-volatile organic compounds (SOCs) in the UK. *Environmental Pollution*. 1998; (102): 105—118. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00069-4.
6. Lee R. M., Hung H., Mackay D., Jones K.C. Measurement and modeling of the diurnal cycling of atmospheric PCBs and PAHs. *Environmental Science and Technology*. 1998; (32): 2172—2179. doi: 10.1021/es980028z.
7. Sweetman A. J., Jones K. C. Declining PCB concentrations in the UK atmosphere: evidence and possible causes. *Environmental Science and Technology*. 2000; (34): 863—869. doi: 10.1021/es9906296.
8. Cousins I. T., Beck A. J., Jones K. C. A review of the processes involved in the exchange of semi-volatile organic compounds (SVOC) across the air-soil interface. *Science of the Total Environment*. 1999; (228): 5—24. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00015-7.

9. Hippelein M., McLachlan M. S. Soil/Air partitioning of semi-volatile organic compounds. 2. Influence of temperature and relative humidity. *Environmental Science and Technology*. 2000; (34): 3521—3526. doi: 10.1021/es991421n.
10. Grundy S. L., Bright D. A., Dushenko W. T., Reimer K. J. Weathering and dispersal of polychlorinated biphenyls from a known source in the Canadian Arctic. *Environmental Science and Technology*. 1996; (30): 2661—2666. doi: 10.1021/es950493l.
11. *Baykalovedeniye. Kniga 1 = Baicalogy. Book 1*. Novosibirsk: Science, 2012; 466 p. (In Russ.).
12. Belozerova I. A., Vladimirov I. N., Ubugunova V. I. et al. Soils of the water protection zone of Lake Baikal and their use. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*. 2016; (5): (70—82). (In Russ.).
13. EPA Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography. Available at: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/8082a.pdf> (accessed on: 22.03.2024).
14. Mackay D., Shiu W. Y., Ma K.-C., Lee S. C. Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2-nd ed. 2006; 1343 p. doi:10.1201/9781420044393.
15. Li N., Wania F., Lei Y. D., Daly G. L. A comprehensive and critical compilation, evaluation, and selection of physical—chemical property data for selected polychlorinated biphenyls. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2003; (32): 1545—1590. doi: 10.1063/1.1562632.
16. Kömp P., McLachlan M. S. Interspecies variability of the plant/air partitioning of polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Technology*. 1997; (31): 2944—2948. doi: 10.1021/es970141+.
17. Harner T., Bidleman T. F. Measurements of octanol-air partition coefficients for polychlorinated biphenyls. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 1996; (41): 895—899. doi: 10.1021/je960097y.
18. Chen J., Xue X., Schramm K.-W. et al. Quantitative structure—property relationships for octanol—air partition coefficients of polychlorinated biphenyls. *Chemosphere*. 2002; (48): 535—544. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00103-0.
19. Burkhard L. P., Armstrong D. E., Andren A. W. Henry's law constants for the polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Technology*. 1985; (19): 590—596. doi: 10.1021/es00137a002.
20. Zapevalov M. A., Levshin D. G., Luk'yanova N. N. et al. Pollution of soils and adjacent environments of the coastal zone of Southern Baikal with toxic chemicals. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2023; (4): (66—76). (In Russ.). doi: 10.52002/0130-2906-2023-4-66-76.
21. Parnis J., Mackay D. *Multimedia environmental models: The fugacity approach. Third edition*. Publishing House of Boca Raton. 2020; 301 p. doi: 10.1201/9780367809829.
22. Li Y. F., Harner T., Liu L. et al. Polychlorinated biphenyls in global air and soil: distributions, air—soil exchange, and fractionation effect. *Environmental Science and Technology*. 2010; (44): 2784—2790. doi: 10.1021/es901871e.
23. Harner T., Bidleman T. F., Jantunen L. M. M., Mackay D. Soil—air exchange model of persistent pesticides in the US cotton belt. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2001; (20): 1612—1621. doi: 10.1002/etc.5620200728.
24. Ruzickova P., Klanova J., Cupr P. et al. An assessment of air-soil exchange of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides across Central and Southern Europe. *Environmental Science and Technology*. 2008; (42): 179—185. doi: 10.1021/es071406f.
25. Koblizkova M., Ruzickova P., Cupr P. et al. Soil burdens of persistent organic pollutants: their levels, fate, and risks. Part IV. Quantification of volatilization fluxes of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls from contaminated soil surfaces. *Environmental Science and Technology*. 2009; (43): 3588—3595. doi: 10.1021/es9003944.
26. Meijer S. N., Ockenden W. A., Sweetman A. J. et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes. *Environmental Science and Technology*. 2003; (37): 667—672. doi: 10.1021/es025809l.
27. Bidleman T. F., Leone A. D. Soil-air exchange of organochlorine pesticides in the Southern United States. *Environmental Pollution*. 2004; (128): 49—57. doi: 10.1016/j.envpol.2003.08.034.
28. Karickhoff S. W. Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils. *Chemosphere*. 1981; (10): 833—846. doi: 10.1016/0045-6535(81)90083-7.
29. Hippelein M., McLachlan M. S. Soil—air partitioning of semivolatile organic compounds. 1. Method development and influence of physiochemical properties. *Environmental Science and Technology*. 1998; (32): 310—316. doi: 10.1021/es9705699.

30. Wania F., Haugen J-E., Mackay D. Temperature Dependence of Atmospheric Concentrations of Semi-volatile Organic Compounds. *Environmental Science and Technology*. 1998; 32(8): 1013—1021. doi: 10.1021/es970856c.
31. Samsonov D. P., Kochetkov A. I., Pasyukova E. P., Zapevalov M. A. Content of persistent organic pollutants in the components of the unique ecological system of Lake Baikal. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2017; (5): (105—115). (In Russ.).
32. Mamontova E. A., Mamontov A. A. Air Monitoring of Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides in Eastern Siberia: Levels, Temporal Trends, and Risk Assessment. *Atmosphere*. 2022; (13): 1—26. doi: 10.3390/atmos13121971.
33. Zapevalov M. A., Samsonov D.P., Kochetkov A.I. et al. Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Arctic zone of the Russian Federation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2020; (9): (90—103). (In Russ.).
34. Official website of the Baikal municipal formation of the Slyudyansky district of the Irkutsk region. Available at: <https://gorod-baikalsk.ru/industry-html> (accessed on: 22.03.2024).
35. On approval of sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans”. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed on: 22.03.2024).
36. Mamontov A., Mamontova E., Tarasova E. et al. Persistent organic pollutants in soil and snow from the Lake Baikal Region, Russia. *Organohalogen compounds*. 2004; (66): 1327—1332.
37. Dumanoglu Y., Altioek H., Kara M., Elbir T. Spatial and temporal variation and air—soil exchange of atmospheric PAHs and PCBs in an industrial region. *Atmospheric Pollution Research*. 2012; (3): 435—449. doi: 10.5094/APR.2012.050.
38. Kukharchik T. I. *Polikhlorirovannyye bifenily v Belarusi = Polychlorinated biphenyls in Belarus*. Minsk: Minsktippiroekt, 2006; 264 p. (In Russ.).
39. Agapkina G. I., Yefimenko Ye. S., Brodskiy Ye. S. et al. Content and distribution of polychlorinated biphenyls in Moscow soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye = Bulletin of Moscow University. Episode 17. Soil science*. 2011; (1): (39—45). (In Russ.).
40. *Polikhlorirovannyye bifenily (PKHB) v Baykal'skom regione: istochniki, dal'niy perenos i otsenka riska (rezul'taty granta INTAS 2000-00140) = Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Baikal region: sources, long-range transport and risk assessment (results of grant INTAS 2000-00140)*. Irkutsk: Publishing House IG SO RAN, 2005; 52 p. (In Russ.).
41. Zhao X., Zheng M., Zhang B. et al. Evidence for the transfer of polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans from soil into biota. *The Science of Total Environment*. 2006; 368(2—3): 744—752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.027.
42. Mamontova E. A., Tarasova E. N., Levshina S. I. et al. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in the atmospheric air-soil system in the south of the Russian Far East. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2014; (11): (45—55). (In Russ.).
43. Leeuwen C. J., Hermens J. L. M. Risk Assessment of Chemicals: an Introduction. *Publishing House of Kluwer Academic*, 1995; 374 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6102-8.
44. Odabasi M. Department of Environmental Engineering, *Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey*. 2012; Unpublished results.

Информация об авторах

Левшин Дмитрий Геннадьевич, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Институт проблем мониторинга (ИПМ) окружающей среды, levshin@rpatyphoon.ru.

Запевалов Михаил Алексеевич, кандидат химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Институт проблем мониторинга (ИПМ) окружающей среды, заместитель директора, zapevalow@mail.ru.

Бурков Антон Игоревич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Федеральный информационно-аналитический центр Росгидромета, burkov@rpatyphoon.ru.

Information about authors

Dmitry G. Levshin, researcher, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Institute for Environmental Monitoring Problems (IPM).

Mikhail A. Zapevalov, candidate of Chemical Sciences, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Institute for Environmental Monitoring Problems (IPM), Deputy Director IPM.

Anton I. Burkov, candidate of Science in Physics and Mathematics, senior researcher, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Federal Information and Analytical Center of Roshydromet.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.05.2024

Принята после доработки в печать 22.10.2024

The article was received on 30.05.2024

The article was accepted after revision on 22.10.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 739—749.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):XX—XX.

ГЕОИНФОРМАТИКА. ОБЗОР

Научная статья

УДК 004.942:551.509.3:629.735

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749

Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям

Софья Евгеньевна Максимова^{1, 2}, Степан Владимирович Духин²

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия, sofya.maksimova.1992@mail.ru

² АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»

Аннотация. В настоящее время продолжается интенсивный рост применения беспилотных воздушных судов (БВС) для решения различных задач. Современное метеорологическое обеспечение полетов в значительной степени ориентировано на пилотируемую авиацию. В ходе анализа технических характеристик БВС установлены параметры, на которые следует ориентироваться при планировании полета. Для выявления участков, в которых выполнение полета БВС может быть подвергнуто повышенному риску авиационных инцидентов или происшествий в определенный момент времени по причине несоответствия погоды эксплуатационным характеристикам судна, могут быть использованы геоинформационные системы.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, метеоэлемент, геоинформационные системы, модели прогноза погоды.

Для цитирования: Максимова С. Е., Духин С. В. Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 739—749. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749.

Original article

Geoinformation approach to constructing an optimal route for an unmanned aerial vehicle taking into account meteorological restrictions***Sofya E. Maksimova^{1, 2}, Stepan V. Duhin²***¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia² JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”

Summary: Currently, there continues to be an intensive growth in the use of civil unmanned aerial vehicles to solve various problems. To model the optimal route for an unmanned aerial vehicle, it is necessary to take into account many factors, including meteorological restrictions. Modern meteorological support for flights is largely focused on manned aircraft. When planning a flight, unmanned aerial vehicle pilots spend a lot of time studying the weather forecast. They study information on the Internet on sites that are not focused on providing information for aviation. Technical characteristics of the unmanned aerial vehicle various types on the Internet and in flight manuals were studied and analyzed. In order to identify meteorological restrictions, pilots should focus on information about the operating environment temperature, wind speed, IP class, availability a ban on flight operations in conditions of thunderstorms, hail, rain, fog, etc. for a specific type or single instance of an unmanned aerial vehicle. Geographic information systems are used to solve various problems in the field of meteorology. Geographic information systems are used both to analyze information about atmospheric processes and phenomena, and to solve applied meteorological problems. The software can be used to identify areas where a particular type of unmanned aerial vehicle may be at increased risk of incidents or accidents at a given time due to weather conditions not suiting the aircraft's operational characteristics. The use of geoinformation tools for analyzing discrete fields of spatio-temporal distribution of meteorological elements can form an array of information for a decision support system for constructing unmanned aerial vehicle optimal routes.

Keywords: unmanned aerial vehicle, weather element, geoinformation systems, weather forecast models.

For citation: Maksimova S. E., Duhin S. V. Geoinformation approach to constructing an optimal route for an unmanned aerial vehicle taking into account meteorological restrictions. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):739—749. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749.

Введение

В настоящее время в гражданской авиации продолжается интенсивный рост применения беспилотных воздушных судов¹ (далее — БВС) для авиационных работ и воздушных перевозок. Пользователи воздушного пространства в сроки, определенные требованиями нормативно-правовых документов, подают представление на установление местного или временного режима и план полета. В некоторых случаях отдельными положениями разрешено выполнение полета

¹ Беспилотное воздушное судно — воздушное судно, управляемое, контролируемое в полете пилотом, находящимся вне борта такого воздушного судна (внешний пилот). Пункт 5 статьи 32 Федерального закона от 19.03.1997 № 60-ФЗ «Воздушный кодекс Российской Федерации».

БВС без установления режима. Основными проблемами автоматизированного планирования полета БВС в трехмерном пространстве являются обоснованность и безопасность моделирования, а также точность решения и способность алгоритмов к глобальной оптимизации в сложных географических условиях [1]. При планировании безопасного полета БВС требуется изучить значительный объем пространственной информации о рельефе местности, зданиях и сооружениях, информацию о структуре воздушного пространства, прогнозируемой погоде по маршруту полета.

Для моделирования оптимального маршрута полета БВС из точки взлета в точку посадки необходимо учитывать не только ограничения, связанные с нормативно-правовыми аспектами организации воздушного движения в воздушном пространстве РФ, но и ограничения по метеорологическим условиям в соответствии с техническими характеристиками БВС. Метеорологические факторы оказывают существенное влияние на взлет, посадку и полет по маршруту БВС [2]. В частности, в работе [2] рассмотрено влияние ветра на дальность и продолжительность полета БВС, зависимость вероятности авиационного происшествия с БВС самолетного и вертолетного типа от скорости ветра. Игнорирование или недостаточное внимание к метеорологическим факторам в ходе подготовки к полету снижает эффективность применения БВС. Причем имеет значение не только анализ прогноза погоды на краткосрочный период, но и тенденции распределения значений метеозлементов в году. Приведены результаты анализа показателей исследуемого района за календарный год. Представлен пример визуализации ограничений в пространстве для полета БВС самолетного типа по метеорологическим условиям. В работе [3] изучено влияние дестабилизирующих воздействий на БВС в полете. Среди дестабилизирующих воздействий природного характера указаны такие факторы, как влияние ветра, температуры воздуха, влажности. Авторы работы [4] в ходе решения задачи по построению оптимального маршрута полета БВС моделируют ограничение по неблагоприятным метеорологическим условиям в виде полигонов, в границах которых перемещение невозможно.

Зарубежные исследователи также уделяют внимание моделированию оптимальных маршрутов полетов БВС гражданской авиации с учетом метеорологических условий. В статье [5] приводится описание негативного воздействия метеорологических факторов на пилотирование БВС. В работе [6] представлен подход к оптимизации траектории полета БВС самолетного типа в модели среды реалистичного микрорайона континентальной Европы. Для моделирования городского климата используется система PALM¹. Автор проанализировал полученные траектории полета и подтвердил, что оптимизация маршрута полета БВС снижает потребление энергии. Авторы работы [7] предлагают построение трехмерной модели, в которой каждой ячейке назначается вероятность неблагоприятных погодных условий, которая периодически обновляется. Данная модель используется в качестве исходных данных для построения оптимального маршрута перемещения БВС.

¹ PALM (PARallelized LES (Large-eddy simulation) Model) — система метеорологического моделирования потоков воздуха, разработанная Ганноверским университетом.

При подготовке и выполнении полета БВС внешние пилоты руководствуются в том числе метеорологической информацией. Во время пилотирования в метеорологических условиях, не соответствующих требованиям документов по эксплуатации БВС, значительно увеличивается риск авиационного инцидента или происшествия.

Объектом настоящего исследования являются ограничения для полетов БВС по метеорологическим условиям. Объект изучается с учетом следующих аспектов: технические характеристики БВС, анализ доступной для внешних пилотов информации о прогнозируемой погоде, анализ полей распределения значений метеозлементов. Цель работы — выполнить обзор применимости геоинформационного подхода к построению оптимальных маршрутов перемещения БВС из точки старта в точку назначения с учетом ограничений по метеорологическим условиям.

Обсуждение и результаты исследований

Современная авиация не может функционировать без обслуживания метеорологической информацией и прогнозов погоды. Метеорологическое обеспечение выполняется в целях обеспечения безопасности, регулярности и эффективности полетов [8]. Обеспечение метеорологической информацией пользователей воздушного пространства РФ регламентировано Федеральными авиационными правилами «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов», утвержденными Приказом Министерства транспорта РФ от 3 марта 2014 г. N 60 (далее — ФАП-60), разработанными в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой Приложения 3 к Конвенции о международной гражданской авиации «Метеорологическое обеспечение международной авиации». Данный нормативно-правовой документ регламентирует порядок выполнения метеонаблюдений на аэродроме, предоставление информации о фактической и прогнозируемой погоде экипажам воздушных судов, органам Единой Системы Организации Воздушного Движения¹ (далее — ЕС ОрВД), пользователям метеорологической информации, обеспечивающим полеты воздушных судов, а также работу с авиационной климатологической информацией.

Метеорологическая информация предоставляется в виде сообщений-сводок (TAF, METAR, SPECI, AIRMET, SIGMET, GAMET² и других) установленной нормативными документами формы, которые составлены метеорологическим органом, содержат метеорологическую информацию для выполнения полетов; также представлены в виде карт особых явлений погоды и прогностических карт ветра и температуры. Сообщения TAF, METAR, SPECI и пр. содержат информацию о погоде на аэродроме, AIRMET и SIGMET — о погоде по маршруту полета

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 28 августа 2015 г. №901 «О Единой системе организации воздушного движения Российской Федерации».

² TAF — Terminal Aerodrom Forecast, METAR — METeorological Aerodrome Report, SPECI — SPECIal Weather Report, AIRMET — AIRman's METeorological Information, SIGMET Significant Meteorological Information, GAMET — General Aviation Meteorological Information.

воздушного судна, GAMET — о погоде в районе полетной информации¹ или его субрайоне (подрайоне). При этом зональные прогнозы используются в качестве прогнозов погоды по вертодромам² и посадочным площадкам. Метеорологическое обеспечение, регламентируемое ФАП-60, в значительной степени ориентировано на пилотируемую авиацию. Информация предоставляется о погоде в целом, без учета специфики типа воздушного судна.

Значительное количество стартов и посадок БВС выполняется не с аэродромов и вертодромов, а со стартово-посадочных площадок, не внесенных в документы аэронавигационной информации. Полеты БВС часто выполняются на небольшие расстояния, несопоставимо меньшие по сравнению с районами прогнозирования погоды. Многие внешние пилоты при подготовке к полету руководствуются в том числе сведениями в сети Интернет, содержащимися на геосервисах с прогнозами погоды, не ориентированными на предоставление информации для планирования полетов воздушных судов.

Современные геосервисы, в которых пользователи могут взять картографическую информацию о структуре воздушного пространства [9], дополнительно предоставляют сведения о метеорологической ситуации. Однако в данных ресурсах не предусмотрена возможность автоматизированного построения ограничений в соответствии с техническими характеристиками типа или единичного экземпляра БВС по пространственно-временному распределению метеоэлементов.

Таким образом, анализ информации о прогнозируемой погоде в районе выполнения полета производится внешними пилотами с учетом технических характеристик БВС без использования инструментов ГИС-анализа. С учетом необходимости обработки значительного объема информации вручную могут возникать значительные временные затраты для выполнения качественного изучения прогнозируемой погоды по маршруту полета, которые можно снизить благодаря применению моделирования в ГИС. Анализ прогнозируемой погоды средствами ГИС необходим для поддержки принятия решений в рамках планирования полета.

Геоинформационные системы используются как для анализа информации об атмосферных процессах и явлениях, так и для решения прикладных метеорологических задач (в том числе в области синоптической метеорологии) в условиях недостаточной плотности метеостанций. Для прогнозирования погоды выполняется восстановление некоторых полей пространственного распределения метеорологических элементов: температура и характеристики влажности воздуха у поверхности земли, атмосферное давление на уровне моря, барическая тенденция, облачность, осадки и т.д. [10].

¹ «район полетной информации» — воздушное пространство определенных размеров, в пределах которого обеспечиваются полетно-информационное обслуживание и аварийное оповещение (Пункт 2 Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 11 марта 2010 г. №138). В свою очередь, субрайон — часть района полетной информации.

² Вертодром — участок земли или определенный участок поверхности сооружения, предназначенный полностью или частично для взлета, посадки, руления и стоянки вертолетов. (Пункт 1.1 статьи 40 Федерального закона от 19.03.1997 № 60-ФЗ «Воздушный кодекс Российской Федерации»).

При наличии глобальных моделей прогноза погоды (GFS, IFS, ПЛАВ, UKMet¹ и другие) много внимания уделяется исследованию физического состояния атмосферы на региональном уровне. При анализе мезомасштабных возмущений атмосферной циркуляции с учетом интерполяции полей давления и температуры воздуха у поверхности земли необходимо принимать во внимание влияние рельефа местности на восстанавливаемую метеорологическую величину и ее фактические горизонтальные и вертикальные градиенты [11]. Геоинформационные системы используются для интеграции и анализа большого объема пространственной информации из различных систем наблюдения (в частности, данные, получаемые сетью метеорологических станций, а также данные дистанционного зондирования Земли). Комплексирование различной информации, характеризующей одну и ту же метеорологическую величину с учетом достоинств каждой системы получения информации и минимизации ее ошибок, позволяет повысить качество анализа этой величины [12, 13]. Сформированные уточненные поля пространственно-временного распределения метеорологических величин могут быть использованы в качестве мезомасштабного сигнала в глобальных и региональных моделях прогноза погоды.

Задача по моделированию оптимального маршрута перемещения БВС предполагает анализ фактической и прогнозируемой метеорологической обстановки с целью определения областей, недоступных для выполнения полета, а также уверенность в том, что значения метеозлементов по траектории перемещения находятся в пределах эксплуатационных ограничений БВС.

В ходе изучения и анализа технических характеристик БВС, опубликованных на сайтах производителей в сети Интернет и руководств летной эксплуатации, установлено, что для выявления ограничений по метеорологическим условиям следует ориентироваться на информацию о температурном диапазоне рабочей среды, скорости ветра, степени защиты оболочки (класс IP), наличие запрета на выполнение полета в условиях грозы, града, дождя, тумана и пр. для конкретного типа или единичного экземпляра БВС.

Температурный диапазон рабочей среды БВС — это диапазон от минимальной до максимальной рабочей температуры окружающей среды, при котором БВС работает в штатном режиме. При планировании полета БВС следует учитывать понижение температуры воздуха с набором высоты.

Показатель *максимально допустимой скорости ветра* предполагает максимальное значение скорости перемещения воздуха за единицу времени, при которой БВС способен выполнять полет. Если скорость ветра превышает максимально допустимое значение, пилотируемый БВС подвергается повышенной опасности.

¹ GFS (Global Forecast System), IFS (Integrated Forecasting System), ПЛАВ (ПолуЛарганжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности), UKMet (the United Kingdom Met Office's model) — модели прогнозирования погоды, разработанные Национальной службой по мониторингу атмосферы и океана США (NOAA), Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Гидрометцентром России совместно с Институтом вычислительной математики РАН, Метеорологической службой Соединенного Королевства соответственно.

Степень защиты оболочки (класс IP¹) — класс степени защиты согласно стандартам (IEC² 60529, DIN³ 40050), обеспечиваемый оболочкой БВС от попадания внешних твердых предметов (частиц) или частиц осадков. По значению первой цифры в классе возможно определить защиту от частиц определенного диаметра, пыли или пыленепроницаемость, по значению второй цифры — защиту от влаги (каплепадения, дождевания, обрызгивания и т. д.). По значению IP можно определить способность БВС выполнить полет в условиях наличия в атмосфере пыли, града или капель дождя определенного диаметра.

В руководстве летной эксплуатации типа БВС или иных документах может быть установлен *запрет на выполнение полетов в условиях грозы, града, дождя, тумана* и пр. В этом случае для того, чтобы описать ограничение на полет, следует ориентироваться еще и на нижнюю границу облаков. В случае, если в документах содержится *запрет на выполнение полета БВС в облаке*, для корректного описания ограничения следует использовать такие параметры, как: нижняя граница облаков и их вертикальная протяженность. Безусловную опасность для БВС представляют *облака вулканических извержений*.

Анализ полей пространственно-временного распределения значений метеоэлементов выполняется согласно формуле (1):

$$I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{\text{бвс}}(m), \quad (1)$$

где $I_{(x,y,z,t)}$ — ячейка пространства по координатам x, y, z в момент времени t ; m — значение метеоэлемента; $\Phi_{\text{бвс}}$ — функция, определяющая соответствие метеоэлемента ограничениям для типа или единичного экземпляра БВС.

Таким образом, ячейке пространства по координатам x, y, z в момент времени t присваиваются значения в диапазоне от 0 до 1, означающие меру соответствия или несоответствия эксплуатационным ограничениям для полета БВС. Совокупность смежных ячеек пространства, в которых невозможен полет БВС по причине действия ограничений по метеорологическим условиям, следует объединить. Ограничение для перемещения БВС принимает вид многогранника в момент времени, которое можно выразить уравнением (2):

$$C_i = \Phi \left\{ [P_1(X_1, Y_1, Z_1), P_2(X_2, Y_2, Z_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, Z_n)], (t), (A) \right\}, \quad (2)$$

где P_n — n -я точка многоугольника; X_n — абсолютная широта точки; Y_n — абсолютная долгота точки; Z_n — абсолютная высота точки; t — время; A — факт ограничения по метеорологическим параметрам.

Тогда совокупность пространственно-временных ограничений следует выразить по формуле (3):

$$Zm = (Zm_i, i = 1, N), \quad (3)$$

где Zm — совокупность ограничений в воздушном пространстве для конкретного полета БВС по планируемой траектории перемещения; Zm_i — i -е ограничение.

¹ Ingress Protection — защита от проникновения.

² International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия (МЭК).

³ Deutsches Institut für Normung — Немецкий институт стандартизации.

Полученные результаты исследования могут послужить основой геоинформационного подхода к моделированию оптимального маршрута перемещения беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям.

Вычисление оптимального маршрута перемещения БВС гражданской авиации из точки старта в точку назначения с установлением местного или временного режима предполагает построение модели соответствующего сегмента воздушного пространства, в котором есть различные ограничения. Воздушным законодательством предусмотрено наличие элементов, ограничивающих перемещение БВС: запретные зоны, опасные зоны, воздушное пространство над населенными пунктами, приграничная полоса и другие. Указанные ограничивающие элементы локализованы в границах, описанных с применением пар координат, высоты, интервалов времени. Для БВС с конкретным бортовым номером или для отдельной категории БВС может быть сделано исключение из ограничения.

Таким образом, для вычисления воздушного пространства, доступного для построения оптимального маршрута перемещения БВС, необходимо исключить («стереть») в модели сегмента воздушного пространства участки с пространственно-временными ограничениями, в которых временный или местный режим не может быть установлен. Кроме того, необходимо исключить участки, в границах которых полет невозможен по причине несоответствия погоды техническим характеристикам типа или единичного экземпляра БВС. Формула, описывающая воздушное пространство, в котором возможно моделировать оптимальный маршрут полета конкретного БВС из точки старта в точку назначения, выглядит следующим образом (4):

$$ВП_j = ВП - (Z_{вп} - Z_{искл}) - Z_m, \quad (4)$$

где $ВП_j$ — воздушное пространство, доступное для планирования полета j -го БВС, $ВП$ — сегмент воздушного пространства, $Z_{вп}$ — совокупность ограничений в воздушном пространстве для j -го БВС, $Z_{искл}$ — совокупность исключений из ограничений в воздушном пространстве для j -го БВС.

В полнофункциональных геоинформационных системах реализованы инструменты построения оптимальных маршрутов перемещения. Кроме того, предусмотрена возможность интеграции скриптов на языке программирования Python. Инструменты построения оптимальных маршрутов перемещения на основе алгоритма Дейкстры используют графы пространственных данных. В данном случае модель сегмента воздушного пространства выполнена в виде графа, вершины которого расположены с интервалом¹ 10 м по высоте. При наличии ограничения в воздушном пространстве, в границах которого полет БВС невозможен по причине несоответствия значений метеоэлементов его техническим характеристикам,

¹ Размеры графа пространственных данных предложены на основании Приказа Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Инструкций по разработке, установлению, введению и снятию временного и местного режимов, а также кратковременных ограничений» от 27.06.2011 №171, Приказа Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении табеля сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации» от 24.01.2013 №13 и личного профессионального опыта авторов по подготовке планов полетов и представлений на установление местных и временных режимов.

из пространственного графа данный участок исключается. Оставшимся ребрам присваиваются значения, отражающие степень соответствия метеорологических условий техническим характеристикам j -го БВС. При этом получившийся граф становится входными данными для алгоритмов вычисления оптимального маршрута перемещения БВС в воздушном пространстве.

Заключение

В статье обсуждается необходимость метеорологического обеспечения для планирования полетов БВС гражданской авиации и предложен конкретный подход к учету ограничений по метеорологическим условиям в геоинформационном моделировании воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения БВС. Научная новизна состоит в необходимости построения модели сегмента воздушного пространства в рамках геоинформационной системы в виде графа пространственных данных, в котором исключены («стерты») участки, где выполнение полетов невозможно по причине несоответствия метеорологических условий техническим характеристикам БВС. Это позволяет выполнить автоматизированное построение оптимального маршрута полета БВС с применением алгоритма Дейкстры и его модификаций.

Выявлены параметры, на которые следует ориентироваться при планировании полета. К ним относятся температурный диапазон рабочей среды БВС, максимально допустимая скорость ветра, степень защиты оболочки (класс IP), запрет на выполнение полетов в условиях грозы, града, дождя, тумана, запрет на выполнение полета БВС в облаке, невозможность пилотировать в условиях наличия облаков вулканических извержений.

Для функционирования инструмента автоматизированного построения оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения необходима корректная модель воздушного пространства, в которой должны быть учтены основные принципы организации воздушного движения и физико-географические факторы, значимые для пилотирования БВС. В настоящее время построение маршрутов полетов из точки старта в точку назначения выполняется внешними пилотами вручную, специализированного метеорологического обеспечения для полетов БВС не предусмотрено, соответственно, автоматизированное геозонирование воздушного пространства по степени приемлемости выполнения полета невозможно. Все вышеперечисленное увеличивает издержки от выполнения полетов по субоптимальным маршрутам и увеличивает риск авиационных инцидентов и происшествий.

Список литературы

1. Yin S., Yang J., Ma L. et al. An Enhanced Whale Algorithm for Three-Dimensional Path Planning for Meteorological Detection of the Unmanned Aerial Vehicle in Complex Environments // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 60039—60057. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394055.
2. Горбунов А. А., Галимов А. Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала //

- Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. №2. С. 7—15.
3. Кузнецов И. Е., Мельников А. В., Рогозин Е. А., Страшко О. В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Том 45. №2. С.125—139. doi:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139.
 4. Лавренков К. Е., Шевелёва А. П., Романов О. Т., Машкин М. Н. Задача выбора оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата при противодействующих, географических и погодных ограничениях в области полёта // Инновационные технологии в проектировании и производстве. 2021. №4. С.22—28. doi: 10.52190/2073-2597_2021_4_22.
 5. Gao M., Hugenholtz C., Fox T. et al. Weather constraints on global drone flyability // Scientific Reports. 2021. V. 14. P. 309—312. doi: 10.1038/s41598-021-91325-w.
 6. Rienecker H., Hildebrand V., Pfifer H. Energy optimal 3D fight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments // CEAS Aeronautical Journal. 2023. Vol. 14. P. 621—636. doi: 10.1007/s13272-023-00666-x.
 7. Zhang B., Tang L., Roemer M. Probabilistic Weather Forecasting Analysis for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2014. Vol. 37. P. 309—312. doi: 10.2514/1.61651.
 8. Болелов Э. А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Том 21. №5. С.117—129. doi: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129
 9. Максимова С. Е. Геопорталы для планирования полетов беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве Российской Федерации // Наука и технологии железных дорог. 2023. №26. С. 47—52.
 10. Фалейчик Л. М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2012. Том 10. Вып. 2. С. 14—24.
 11. Калинин Н. А., Ветров А. Л., Смирнова А. А. Мезомасштабный анализ и сверхкраткосрочный прогноз погоды // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2009. Том 151. Вып. 4. С.209—216.
 12. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 53—60.
 13. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Численный анализ данных радиолокационных дистанционных измерений облачности // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 31—39.

References

1. Yin S., Yang J., Ma L. et al. An Enhanced Whale Algorithm for Three-Dimensional Path Planning for Meteorological Detection of the Unmanned Aerial Vehicle in Complex Environments. *IEEE Access*. 2024; (12): 60039—60057. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394055.
2. Gorbunov A. A., Galimov A. F. The influence of meteorological factors on the use and flight safety of unmanned aerial vehicles with side repeater radio. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii = Bulletin of St. Petersburg University of the Emergency Ministry Russia State Fire Service*. 2016; (2): (7—15). (In Russ.).
3. Kuznetsov I. E., Melnikov A. V., Rogozin E. A., Strashko O. V. Methodology for accounting the influence of meteorological factors on the efficiency of application of unmanned aerial vehicles on the basis of system analysis. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2018; 45(2): (125—139). (In Russ.). doi:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139
4. Lavrenov K. E., Shevelyova A. P., Romanov O. T., Mashkin M. N. The problem of choosing the optimal route for an unmanned aerial vehicle with opposing, geographic and weather restrictions in the flight area. *Innovatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve = Information technology of CAD/CAM/CAE*. 2021; (4): (22—28). doi: 10.52190/2073-2597_2021_4_22. (In Russ.).

5. Gao M., Hugenholtz C., Fox T. et al. Weather constraints on global drone flyability. *Scientific Reports*. 2021; (14): 309—312. doi: 10.1038/s41598-021-91325-w.
6. Rienecker H., Hildebrand V., Pfifer H. Energy optimal 3D fight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments. *CEAS Aeronautical Journal*. 2023, (14): 621—636. doi: 10.1007/s13272-023-00666-x.
7. Zhang B., Tang L., Roemer M. Probabilistic Weather Forecasting Analysis for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2014; (37): 309—312. doi: 10.2514/1.61651.
8. Bolelov E. A. Meteorological support for civil aviation flights: problems and ways of their solution. *Nauchny vestnik MGTU GA = Scientific bulletin of MSTU C.A.* 2018; 21(5): (117—129). doi: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129. (In Russ.).
9. Maksimova S. E. Geoportals for unmanned aerial vehicles planning flights in the Russian Federation airspace. *Nauka i tehnologii zheleznih dorog = Railway science and technology*. 2023; (26): (47—52). (In Russ.).
10. Faleychik L. M. GIS support for numerical modeling of local atmospheric processes. *Vestnic NGU. Seria: Informacionnye tehnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2012; 10(2): (14—24). (In Russ.).
11. Kalinin N. A., Vetrov A. L., Smirnova A. A. Mesoscale Analysis and Ultra Short-term weather forecast. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2009; 151(4): (209—216). (In Russ.).
12. Kalinin N. A., Smirnova A. A. Combined use of radar and station observations for cloud field analysis. *Meteorologia i gidrologia = Meteorology and hydrology*. 2002; (8): (53—60). (In Russ.).
13. Kalinin N. A., Smirnova A. A. Numerical analysis of cloud radar remote sensing data. *Meteorologia i gidrologia = Meteorology and hydrology*. 2003; (7): (31—39). (In Russ.).

Информация об авторах

Максимова Софья Евгеньевна, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», аспирант III года обучения кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация»; АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», ведущий специалист отдела спутникового мониторинга, sofya.maksimova.1992@mail.ru.

Духин Степан Владимирович, кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», начальник научно-технического комплекса геоинформационных систем и спутниковых технологий, duhin.s@yandex.ru.

Information about authors

Maksimova Sofya E., Russian University of Transport, 3rd year postgraduate student of the Department of Geodesy, Geoinformatics and Navigation; JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”, leading expert of the satellite monitoring department, sofya.maksimova.1992@mail.ru.

Dukhin Stepan V., Candidate of Technician Sciences, JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”, Head of the Scientific and Technical Complex of Geoinformation Systems and Satellite Technologies, duhin.s@yandex.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.04.2024

Принята после доработки в печать 20.11.2024

The article was received on 22.04.2024

The article was accepted after revision on 20.11.2024

ХРОНИКА. ИСТОРИЯ. ПЕРСОНАЛИИ

CHRONICLE. STORY. PERSONALIES

УДК [551.5+556](09)«364»

Военные и трудовые будни гидрологов и метеорологов в период блокады Ленинграда на основе мемуаров сотрудников Гидрологического института (1941—1944 гг.)

Алла Олеговна Волгушева

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

Аннотация. На основе рукописи писателя Михаила Леонидовича Слонимского, хранящейся в Центральном государственном архиве литературы и искусства Санкт-Петербурга (ЦГАЛИ СПб), приводятся воспоминания сотрудников о Гидрологическом институте в Ленинграде в 1941—1944 гг.

Ключевые слова: Российский гидрологический институт, Государственный гидрологический институт, блокада Ленинграда, гидрологи, метеорологи, Гидрометслужба Красной Армии (ГУГМС КА).

Military and work life of hydrologists and meteorologists during the siege of Leningrad based on the memoirs of employees of the Hydrological Institute (1941—1944)

Alla Volgusheva

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Введение

Российский гидрологический институт был основан 7 октября 1919 г. и являлся ведущим научно-исследовательским учреждением в области гидрологии суши и водных ресурсов.

В 1926 г. произошло его переименование в Государственный гидрологический институт, что свидетельствует о повышении его статуса и, соответственно, значимости. Все работники института были коренными ленинградцами. По свидетельству сотрудника института, в дальнейшем техника-лейтенанта, Елены Михайловны Селюк: «...пятиэтажное здание на Васильевском острове стало с годами просто нашим родным домом, каждый уголок, каждая ступенька здесь были издавна известны нам. Сотрудники являлись на работу с тем удовольствием, какое очень известно всем, кто занят любимым делом» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Первоначально институт занимался изучением всех видов природных вод, о чем опять же вспоминала Е.М. Селюк: «Мы с большим удовольствием разрабатывали методику предсказаний сроков вскрытия и замерзания водоемов, горизонтов высоких и низких вод в реках и озерах и других гидрологических явлений, институт стремился стать подлинным хозяином всех водных пространств. В 1941 году институт закончил капитальный труд – составление сводных работ по рекам, морям, озерам и болотам Советского Союза» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Вследствие появления различных направлений были образованы морской отдел и отдел гидрологии суши, подобная структура института просуществовала до начала Великой Отечественной войны [1].

Накануне блокады

Война внесла свои коррективы в работу института. С самого начала войны Государственный гидрологический институт стал военной организацией, находясь в структуре Главного Управления Гидрометслужбы Красной Армии (ГУГМС КА). В 1941 г. было принято решение об эвакуации части института на Урал. Переезд был осуществлен в три этапа, при этом вывозились часть библиотеки, оборудование, научные архивные фонды, что позволило сразу приступить к работе на новом месте.

Часть океанологов под руководством В. В. Тимонова эвакуировались в Мурманск и Архангельск. Более 100 сотрудников ушли на фронт, многие из которых не вернулись. Обслуживание Ленинградского, Балтийского и соседних фронтов обеспечивалось 212 сотрудниками института, оставшимися работать в Ленинграде под руководством Смирнова, при этом 65% из них были женщины.

Обращаясь к воспоминаниям Е. М. Селюк, мы погружаемся в бытовые и рабочие подробности жизни ее коллег, когда она в свойственной ей манере, называет их порой то по фамилиям без инициалов, то просто по именам, часто уменьшительно-ласкательным, тем не менее, нам важны все подробности живых свидетелей: «Группа сотрудников занималась предсказаниями и информацией о состоянии вод области. Для лучшей координации работ, они объединились с воинской частью инженер-полковника Семенова, сутками не выходили из рабочих помещений Пальникова, Соколова, Буллах. Бригада, которой руководил В.К. Давыдов, неоднократно выходила на передний край обороны, решала задачи создания искусственных водных преград, как средства обороны. Так, товарищи Шнее, Азубукина и Узель под руководством товарища Артамонова составляли карты заболоченности, используя весь, накопленный институтом материал. Химики Андреева и Мусина давали фронту сведения о химическом составе вод на территории военных действий. Работники морского отдела (все женщины): Амосова, Спенлер, Луи-Свет, Шапаева, Иванова, Розанова подготавливали гидрологические пособия и атласы для Балтийского Флота. Все, что было создано институтом в мирные времена, шло теперь на оборону, теснейшая связь с фронтом не прерывалась ни на миг, это укрепляло нас, воодушевляло, мы чувствовали себя нужными, полезными

людьми и в это была наша высшая радость» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Работали сотрудники института и на строительстве оборонительных рубежей: «Многие ленинградские женщины, и среди них женщины Гидрологического института, вложили свой труд в бесхитростные, но трудоемкие сооружения. На подступах к Ленинграду и под старинным русским городом Новгородом нескончаемой цепью протянулись вдаль грандиозные противотанковые рвы. Пройдут годы, и экскурсоводы будут показывать их новому поколению советских людей и расскажут им о их строителях. Мы знаем этих строителей. Вот, скромная девушка стеклографистка Надя Иванова, без усталости переносившая на носилках тяжелый дерн для облицовки канав, старший техник Цива Кубанец, Галя Буллах, Марина Беляева, научный сотрудник коммунистка Селянкина и многие другие. Особенно тяжело приходилось молодому инженеру Тане Троицкой. Беременная, она наравне со всеми работала, отказываясь от разрешенного ей возвращения в Ленинград. Когда же стальное кольцо блокады сомкнулось, работы велись в непосредственной близости к городу, и до начала 1942 года, женщины голодные, опухшие, бесценно продолжали выполнять порученное им дело. Ветеранами трудового фронта стали старший инженер Оя, инженеры Тараканова, Милославская, Конюшевская, старший техник Александрова, Порфирьева, машинистка Веселова и другие» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Работа в дни блокады

Необычной стала жизнь Ленинграда. Воздушные тревоги следовали одна за другой, варварские бомбежки и обстрелы убивали и калечили людей. Остановились трамваи, потух электрический свет, не стало топлива, радио — единственная связь с «Большой Землей» — работало с перебоями, но самым трудным испытанием был голод. Чтобы получить крошку хлеба, надо было простоять в длинной очереди, но трудно уже было и ходить, и стоять. В первую блокадную зиму работа Гидрологического института прерывалась лишь для несения вахты на крышах и чердаках, бомбоубежищах, где собирались старики и женщины с детьми из соседних домов.

Постоянная команда местной противовоздушной обороны института состояла приблизительно из ста человек, шестьдесят из которых были женщины. Командир отделения Розанова, ее заместитель Кубанец, бойцы Петрова, Серебренникова, Авдеева ночи напролет бегали по этажам, следя за порядком. Телефонистки Ковальчикова и Высоченкова всегда находились на своем посту. Их труд в мирное время кардинально отличался от работы в период блокады, когда они закопченными руками, в помещении с нулевой температурой, при жалком свете коптилок, печатали целые простыни цифровых материалов, не допуская при этом ни одной ошибки, поскольку любая ошибка могла оказаться роковой на фронте.

Командир медико-санитарного отделения Волкова, ее заместитель Федотова, бойцы Буллах, Вегрихт, Завьялова, Шнее, Тараканова, Надя Иванова оказывали

помощь и сотрудникам института, и жильцам соседних домов. Помощь требовалась не только при ранении, но и тем, кто падал в изнеможении, обессиленный голодом и недосыпом, при этом сами еле передвигали ноги от слабости, но находили в себе силы колоть дрова, отапливать помещение стационара, обслуживать своих товарищей (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

В последние недели 1941 г. здание гидрологического института выглядело необитаемым и мало чем отличалось от других зданий города: окна заколочены досками и фанерой, возле парадной сугробы снега. Однако кажущаяся необитаемость здания была обманчивой. Институт жил и работал. Рабочий день стал понятием условным, так как работали сотрудники института круглые сутки, начиная день с заготовки топлива. Даже те, кто уже настолько ослаб, что не мог подняться с постели, работали у себя дома, выполняя задания фронта. Самое главное, как утверждала Е. М. Селюк, «вопреки всем невыносимо тяжким условиям, научная жизнь не гасла и не замирала» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Гидрологи составляли необходимые для фронта сведения, но эти справки нужно было еще доставить на места, в различные концы фронтового города под обстрелом артиллерии. Этим занималось подразделение, состоящее из 15-20 человек под руководством тов. Вегрихта. В блокадные дни всякая самая пустяковая работа требовала чрезвычайного напряжения сил, огромные, неведомые ранее трудности возникали на каждом шагу. Например, такая элементарная в мирное время работа как инвентаризация, теперь казалась почти невыполнимой. В относительном порядке находились только материальный и инструментальный склады, благодаря кладовщику тов. Толокнову, который работал на этой должности бесценно 14 лет. Во время блокады он поселился в этих складах, не расставаясь с порученными ему ценностями, все остальное было растеряно и разбросано по зданию.

Бригада под руководством тов. Богомазовой выполняла срочную и ответственную работу по подготовке Гидрологического справочника, в котором нуждался фронт. Из воспоминаний З. П. Богомазовой мы узнаем о том, как выполнялось срочное задание по описанию рек и озер большой территории и составление карты. Елизавета Владимировна Серебренникова составляла карту в самом холодном углу комнаты, придвинувшись к окну, пока был источник естественного света, а по завершении этой тонкой работы, даже не верилось, что она смогла так замечательно справиться с этой задачей при таких невыносимых условиях: «Мы смотрели на карту как на чудо, но чудо было создано руками человека, советской женщины» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Иногда появлялась необходимость в литературе, однако каталог библиотеки был вывезен из Ленинграда, тогда приходили на помощь сотрудники библиотеки Географического общества на Демидовском переулке, но расстояние до адреса составляло 6 км в оба конца. Оправляясь в путь по городу, человек не всегда был уверен, что у него хватит сил добраться до цели. З. П. Богомазова взяла эту работу

на себя, поскольку жила ближе всех к институту и считала, что сил на ходьбу у нее должно оставаться больше, чем у других.

Ни на один день не прекращала оперативную работу бригада, в составе которой был только один мужчина тов. Куприянов, остальные все были женщины: Тараканова, Яворская, Серебренникова, Денисова, Оя, Ванеева и другие. На одной из окраин города бесперебойно трудились сотрудники Гидрометеорологической испарительной станции института товарищи Фарберг, Троткевич. В любую погоду они пробирались к приборам, расположенным на озере по обледенелым пирсам.

Болезнь и смерть

Постепенно голод стал забирать людей, но, в первую очередь, мужчин, глав семейств. Старший научный сотрудник Поллон, постоянно отдававший скудный паек двум своим детям, стал первым умершим от голода сотрудником института. По свидетельству врача, спасти его могли только плитка шоколада и сто граммов масла в день, естественно, задача была невыполнимой для коллег. Со временем то один, то другой сотрудник вдруг исчезал, не являлся на работу, что означало либо болезнь, либо смерть.

Подобная гибель настигла старшего научного сотрудника Георгия Федоровича Уля. Это был немолодой, но очень веселый и жизнерадостный человек, очень любивший ребят и порой забавлявший детей своих сотрудников разного рода играми и выдумками. Дети были в восторге, когда он облачался в какой-нибудь фантастический костюм, рассказывал им сказки. Георгий Федорович любил детей, свою семью, но в тоже время был предан своей работе. Он не покидал в голодную зиму своего рабочего места до самого последнего момента, пока слабость не свалила его. Коллеги иногда получали в столовой для него лишнюю тарелку жидкого супа или делились с ним своими продовольственными талонами. Общими усилиями доставляли ему дрова из института, но всю пищу он отдавал детям — девятилетней Тане и двенадцатилетнему Вите. Ужасна была судьба его семьи. Снаряд, разорвавшись в его квартире, убил его жену и тяжело ранил в голову его маленькую дочь Таню, которая умерла в страшных мучениях через несколько дней. Витя был отброшен ударной волной под рояль, и рухнувшая стена погребла его под собой. Его извлекли из-под обломков, в волосах ребенка появилась седина, но мальчика удалось эвакуировать.

Из воспоминаний З. П. Богомазовой, мы узнаем подробности, как однажды пришла весть о гибели в своей квартире во время пожара сотрудницы Третьяковой, как заболел Давыдов, умер Артамонов. Начальник оперативной группы Фролов крепился, но силы его истощались с каждым днем, в начале декабря он ограничивался лишь личным приемом заданий, а в середине месяца слег и передал руководство З. П. Богомазовой. Она составляла списки сотрудников, разделяя их на относительно здоровых и больных. Была установлена сменность в работе, причем для более слабых число рабочих дней в неделю было уменьшено, разговоры о еде в рабочем помещении теперь пресекались.

Сила товарищества и дружбы

Обратимся к воспоминаниям Т. Я. Авдеевой, которая в своих мемуарах о работе института в те годы уделила вопросам дружбы и поддержки сотрудниками друг друга отдельное внимание.

Так, «Филениус, Волкова, Федотова, Целохович, Кораблева и другие прошли еще во время войны с Финляндией годичные курсы медсестер. Некоторые из них сразу ушли на фронт, остальные работали в медико-санитарном звене команды МПВО института. В бомбоубежище был организован стационар. Когда к весне 1942 года начались розыски неявившихся на работу товарищей, сестры и санитарки оказывали немедленную помощь нуждающимся. Они доставляли на дом обеды, выкупали в магазине паек, приносили воду, а порой делились и своим скудным пайком» (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

З. П. Богомазова в свободные минуты отдавалась заботе о товарищах. Вошло в привычку при заболевании сотрудника или членов его семьи в первую очередь обращаться к ней. Она устраивала ослабленных коллег в стационары и больницы, посещала их, грузила вещи эвакуированных сотрудников, которых отправляли в тыл уже умирающими. Когда на тяжелой работе по слому деревянных домов для обеспечения института топливом заболела Е. М. Селюк, Зинаида Петровна ухаживала за ней, помогала вернуться в строй.

Инженер Анна Яковлевна Оя работала в институте 14 лет, но на вид была несколько замкнутой. В дни блокады проявила себя как исключительно чуткий и заботливый товарищ. Когда квартира старшего инженера Ванеевой сгорела при обстреле, сама Ванеева заболела, Анна Яковлевна в течение года опекала ее, посещала в больнице, не раз ездила за город доставать для нее продукты. Особенное отношение было к семьям военнослужащих. Так, тов. Джоган незадолго до войны был направлен в Эстонскую ССР, а в дни войны стал командиром Красной Армии. Его жена и двое детей вынуждены были эвакуироваться в Ленинград без теплых вещей и самого необходимого. Жене Джогана Оле и сотруднице института Зинаиде Сергеевне Сергеевой, чьи двое сыновей были на фронте, дали комнату в Гидрологическом институте, а Зинаида Сергеевна, имея на руках старуху-мать, по-матерински заботилась об Оле Джоган и ее детях. Таких примеров огромное множество, дружба, поддержка ленинградцев многим спасла жизнь (Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Возвращение к жизни

В феврале 1942 г. вступила в строй «Дорога жизни», в создание которой вложен труд ленинградских гидрологов. Вместе с этим последовало распоряжение об эвакуации большинства работников института. Истощенные от голода люди едва находили в себе силы, чтобы просто прийти за эвакуационными документами. Немногочисленная группа работников, преимущественно женщин, добровольно остававшаяся в Ленинграде, вполне отдавали себе отчет о последствиях,

но чувство долга не позволяло им покинуть город, на них возлагалось сохранение базы института и продолжение обслуживания Ленинградского фронта.

Руководство института возлагалось теперь на Е. М. Селюк, которая до этого момента была помощницей начальника института. Она должна была отвечать за работу, за личный состав, за материальные ценности.

Елена Михайловна вспоминает, что ей пришлось начать с изменения организационной структуры Ленинградского отделения института. Ряд научных и технических работников (Иванова, Конюшевская, Лаан, Эрдман, Петрова) были временно откомандированы в воинскую часть под руководством инженер-подполковника Семенова, где они вместе с бойцами продолжали обеспечивать выполнение заданий фронта.

За зиму город, где не работала канализация, отсутствовали вода и электричество, не убирался снег, был загрязнен невообразимо. Новой угрозой стала надвигающаяся эпидемия. Ленинградцы откликнулись на призыв городской партийной организации и исполкома Ленгорсовета выйти на очистку города. Как вспоминала Елена Михайловна, гнетущее чувство захватило ее, когда она ходила по этажам института, обследуя свое, некогда такое чистое и уютное здание. Ныне царили запустение, зловоние, закрытые кабинеты, ключи от которых не были сданы, а ценнейшая научная библиотека и архив пришли вопреки стараниям в хаотическое состояние. Толстый слой льда, которые не вывозился, сплошь покрывал двор института. Сотрудники, облачившись в ватники, принялись за уборку и, как говорит Елена Михайловна, не то, что привели здание в полный порядок, но хотя бы угроза эпидемии миновала.

Дальше пришлось по спискам проверять личный состав Ленинградского отделения института. Так как на работу являлось лишь 30% работников, возникала мысль о судьбе остальных. Этот труд был очень тяжелым, поскольку часто адреса были неточными, соседи не все были живы, некоторые эвакуировались, а были и те сотрудники, которым помощь уже была не нужна, они покоились на берегу Финского залива или на Охте в братских могилах. Несколько сотрудников с утра уходили на поиски людей, в страшном состоянии некоторые все же были найдены и постепенно графа «отсутствует по неизвестным причинам» начала заполняться.

Заключение

В ноябре 1942 г. с «Большой Земли» прибыл начальник Гидрометеорологической службы СССР, герой СССР тов. Федотов, который ознакомился с работой всех находившихся в Ленинграде подразделений и на совещании актива дал высокую оценку деятельности ленинградских гидрологов и метеорологов, чем они были горды.

Интересным представляется факт, что прорыв блокады Ленинграда все сотрудники института описывают почти одинаково, радость и боль за прожитые трудные, ужасные годы блокады и одновременно чувство гордости, переплетались в их душе: «Несравнима была наша радость, а в радости и в горе, советский человек стремится быть в коллективе и это характерное чувство особенно ярко

проявилось в те счастливые дни» (Е. М. Селюк, Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

«Не передать в словах силу любви наших людей к Родине, к своему прекрасному городу, к институту. Любовь эта выражена в делах. Мы счастливы, что работы, выполненные нами в 1941 году и позднее, в полной мере использованы командованием в планировании боевых операций наших войск в великие дни снятия блокады Ленинграда и освобождения от врага родной Ленинградской области» (З. П. Богомазова, Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

«Мы знали, мы чувствовали, что нестигаем советский народ, мы готовы были на все для достижения победы» (Н. М. Милославская, Центральный государственный архив литературы и искусства Санкт-Петербурга).

Список литературы

1. Вуглинский В. С., Журавлев С. А. Государственному гидрологическому институту — 100 лет // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 142—144.

Информация об авторе

Волгушева Алла Олеговна, кандидат исторических наук, кафедра социально-гуманитарных наук РГТМУ, доцент, Volgusheva_irbis@mail.ru

Information about author

Volgusheva Alla Olegovna, Ph.D. Historical Sciences, Associate Professor, Department of Social Sciences and Humanities, Russian State University of Humanities, Associate Professor, Volgusheva_irbis@mail.ru

К столетнему юбилею Аркадия Павловича Алексеева



Аркадий Павлович Алексеев родился 5 декабря 1924 года в с. Буденновском Донецкой области. С детства увлекался морем и всем, связанным с ним. Свой первый опыт мореплавания получил ребенком, когда в период летних каникул ходил на парусно-моторной шхуне своего дяди по Азовскому морю. Мечтал быть моряком, но началась Великая Отечественная война. В 1942 г. А. П. Алексеев ушел на фронт, где был тяжело ранен, потерял левую руку, долго лечился. Выписавшись из госпиталя в 1944 г., закончил с золотой медалью прерванную учебу в 10 классе школы рабочей молодежи, а на следующий, 1945 год, поступил во вновь созданный в Ленинграде Гидрометеорологический институт по специальности «Океанология».

После окончания института А. П. Алексеев поступает в аспирантуру к знаменитому ученому О. Ю. Визе. В 1951 г. он приезжает в ПИНРО (в наст. вр. филиал ВНИРО) на стажировку и уходит в рейс по изучению морских вод для задач рыбного промысла. Это определило его дальнейшую судьбу. В 1953 г. он успешно защищает диссертацию и окончательно приезжает на работу в ПИНРО. Вся дальнейшая многогранная деятельность Аркадия Павловича посвящена промысловой океанологии. Он постоянно ходил в морские экспедиции, собрал уникальный материал, на основе которого разработал схему течений Норвежского и Гренландского морей, получившую мировое признание и не потерявшую актуальность до настоящего времени.

В середине 1950-х гг. Аркадий Павлович стал страстным сторонником применения подводных обитаемых аппаратов в рыбохозяйственных исследованиях. Он одним из первых погружался на научных батискафах в Баренцево море, участвовал в первой рыбохозяйственной экспедиции на подводной лодке «Северянка». Аркадий Павлович руководил экспедициями института в Северную Атлантику по программе Международного геофизического года и года Международного

геофизического сотрудничества (1957—1959 гг.). В 1962 г. А. П. Алексеев был назначен директором Полярного института и проработал на этой должности до 1974 г. Руководя институтом, Аркадий Павлович заложил основы международных контактов советских океанологов и обеспечил ведущие позиции института в международных исследованиях северных морей, добился значительного расширения научного флота ПИНРО за счет судов, специально спроектированных и построенных для научно-промысловых исследований.

После возвращения в Ленинград с 1974 г. Аркадий Павлович работал старшим научным сотрудником Зоологического института Академии наук и одновременно возглавил Ленинградское отделение Межведомственной Ихтиологической комиссии СССР, где им была создана секция промысловой океанологии. Деятельность секции была направлена на совершенствование океанологических основ рационального использования биологических ресурсов океанов и морей. Ежегодно во ВНИРО проводились научные совещания по обсуждению результатов исследований, что способствовало скорейшему внедрению получаемых научных результатов в практику работы рыбодобывающего флота. Этот период научно-организационной деятельности А. П. Алексеева совпал с введением в 1976 г. всеми прибрежными странами в Мировом океане 200-мильных исключительных экономических зон, иностранное рыболовство в которых категорически запрещалось. Это привело к потере советским рыбопромысловым флотом СССР более трети годового вылова. Требовалось объединить усилия научных организаций Минрыбхоза СССР, а также и других ведомств для обобщения результатов научно-поисковых работ и ретроспективных промыслово-океанологических исследований и на этой основе выявить и передать рыбакам новые объекты промысла в районах свободного рыболовства.

В кратчайшие сроки были организованы десятки научных экспедиций, по результатам которых были переданы рыбакам несколько промысловых районов за пределами исключительных экономических зон прибрежных государств. Прежде всего, это промысловые районы в южной части Тихого океана (ежегодный вылов ставриды около 1 млн. т), а также районы промысла скумбрии, морского окуня и путассу в Северо-Восточной Атлантике. Получаемые в экспедициях данные, а также всю оперативно поступающую гидрометеорологическую и океанологическую информацию, полученную по результатам промысла, необходимо было оперативно обобщать и анализировать. Для этого под эгидой Межведомственной ихтиологической комиссии и ВНИРО проводились регулярные научные конференции по промысловой океанологии. При непосредственном участии А. П. Алексеева с 1977 г. по 2014 г. проведено 13 таких конференций, по результатам которых публиковались сборники тезисов докладов. Наиболее значительные результаты промыслово-океанологических исследований представлялись в тематических сборниках Трудов ВНИРО «Вопросы промысловой океанологии». Решения комиссии и Конференций доносились до руководителей рыбной отрасли и Правительства РФ, что позволило отечественной Промысловой океанологии сохранить, хоть и не в полной мере, потенциал и международный авторитет, накопленный в последней четверти XX века.

Аркадий Павлович также был организатором многочисленных национальных и международных научных форумов по промысловой океанологии, где представлялись результаты исследований отечественных океанологов. Это особенно важно было в последние десятилетия, когда резкое сокращение количества и качества промыслово-статистических данных существенно ограничило использование математических моделей популяции для определения параметров режима рационального рыболовства. В настоящее время в связи с появлением принципиально новых данных дистанционных измерений уровня поверхности океана и вертикальной структуры вод на первый план выходят результаты промыслово-океанологических исследований, основы которых были заложены в конце XX и начале XXI веков. Это способствовало тому, чтобы бассейновые научно-исследовательские институты рыбного и океанографии (ныне – это филиалы Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии – ВНИРО) обеспечивали создание научных основ рационального российского промысла и защите интересов Российской Федерации при выделении квот на вылов международными научными организациями по рыболовству.

Большое внимание А. П. Алексеев уделял проблемам Белого моря. Так, с 1981 г. он принимал участие в мультидисциплинарном проекте «Белое море», который пережил распад СССР и был продолжен в 1990-е годы. Благодаря объединяющим усилиям и энергии Аркадия Павловича в работе Ихтиологической комиссии принимали участие представители добывающих организаций, ученых ведомственных и академических институтов и высших учебных заведений.

Аркадий Павлович, являясь одним из первых выпускников-океанологов ЛГМИ, до последних лет оставался «старшим другом» океанологического факультета и океанологов РГГМУ. В течение многих лет он был членом Государственной аттестационной комиссии океанологического факультета. В начале 90-х гг., когда создавалась кафедра промысловой океанологии, он был одним из создателей дисциплины с таким названием, начал вести занятия по новой дисциплине, и всегда помогал сотрудникам кафедры в поддержании контактов с научными учреждениями Комитета и Федерального агентства по рыболовству.

Аркадий Павлович Алексеев был известным советским океанологом, талантливым организатором науки, автором более 200 научных работ. За участие в Великой Отечественной войне и вклад в науку он был награжден несколькими орденами и медалями. Аркадий Павлович принадлежал к замечательному поколению отечественных океанологов, сформировавших в послевоенные годы современную российскую промысловую океанологию, которая до настоящего времени остается передовой в мире в части рациональной эксплуатации биологических ресурсов Мирового океана.

В большой, наполненной морем, наукой и путешествиями жизни Аркадия Павловича Алексеева отразилась вся эпоха советской океанографии XX века. Он прожил долгую и яркую жизнь, был замечательным, душевным, открытым миру и людям человеком, сделавшим много добра окружающим его людям. Скончался Аркадий Павлович Алексеев 24 июня 2024 года в возрасте 99 лет, т. е. не дожидаясь своего столетнего юбилея всего полгода. Светлая память о дорогом Аркадии Павловиче навсегда сохранится в сердцах его коллег и учеников.

УДК 001(063)(98)

**I Международный Научно-образовательный Форум
«Арктический Научный Диалог»
(Asd2024 — Arctic Scientific Dialogue)
(г. Санкт-Петербург, 14—15 ноября 2024 г.)**

14—15 ноября 2024 года в рамках I Международного научно-образовательного форума «Арктический научный диалог» состоялась научно-практическая конференция «ИНФОГЕО-2024»: «Геоинформационное обеспечение стратегического развития в Арктике», нацеленная на развитие научной деятельности в Арктическом регионе и популяризацию науки среди молодежи.

Форум проводился в рамках проекта «Интерполус» под руководством Министерства науки и высшего образования РФ. Целью инициативы «Интерполус» является проведение научных исследований в Арктике и на всех полюсах Земли,



Рис. 1. Заместитель председателя организационного комитета «ИНФОГЕО-2024» д.т.н., профессор Е. П. Истомин и модератор секции «Беспилотные транспортные системы в Арктике» к.т.н., доцент Я. А. Петров

включая третий полюс, также известный как Гиндукуш-Каракорум-Гималайская система, горных массивах стран СНГ, стран БРИКС и дружественных стран. Концепция «Интерполюс» нацелена на создание нового формата международного сотрудничества между странами Арктического региона, Антарктики и странами, граничащими с ними, а также странами, расположенными в высокогорных районах. Она основывается на идее объединения этих стран для повышения их экономического, экологического и научно-технического потенциала. Ее успех зависит от того, насколько страны готовы проявлять инициативу и принимать решительные действия по сохранению окружающей среды и борьбе с глобальным изменением климата, что существенно повысит их важность в мировой политике и экономике.

В целях укрепления политического, научного, экономического взаимодействия дружественных стран в сфере глобальной климатической повестки и арктического взаимодействия, а также сохранения вовлеченности России в международные научно-образовательные программы в рамках проекта «Интерполюс» проводился Международный научно-образовательный форум «Арктический научный диалог».



Рис. 2. Приветственное слово заместителя председателя комитета Администрации Санкт-Петербурга по делам Арктики

Участие в конференции приняли представители ведущих университетов Санкт-Петербурга, Москвы, Брянска, Волгограда, а также представители стран Европы и Азии: стран БРИКС (Россия, Китай, Индия, Бразилия, ЮАР), ОАЭ, Аргентины, Сингапура, Белоруссии и др., а также заинтересованные в сфере взаимодействия глобальной климатической повестки. Программа встречи включала обсуждение механизмов финансирования совместных научно-исследовательских проектов по линии профильных ведомств и рассмотрение организационной структуры функциональных связей между ответственными структурами стран-участников. Особое внимание уделили инициативе «Белый курс» («Белый курс» — ответ, продвигаемой США и Европой глобальной климатической повестке «Зеленый Новый курс»).

В первый день форума и конференции в Выставочном комплексе «Россия — моя история» почетными гостями и ведущими учеными были представлены доклады в рамках пленарного заседания, дальнейшая работа конференции продолжилась по секциям «Обеспечения безопасности стратегического развития Арктического региона РФ» (модератор — д.т.н., заведующий кафедрой информационных технологий и систем безопасности В. Г. Бурлов) и «Беспилотные транспортные системы в Арктике» (модератор — к.т.н., доцент кафедры прикладной информатики Я. А. Петров). Также в рамках первого дня проведен круглый стол

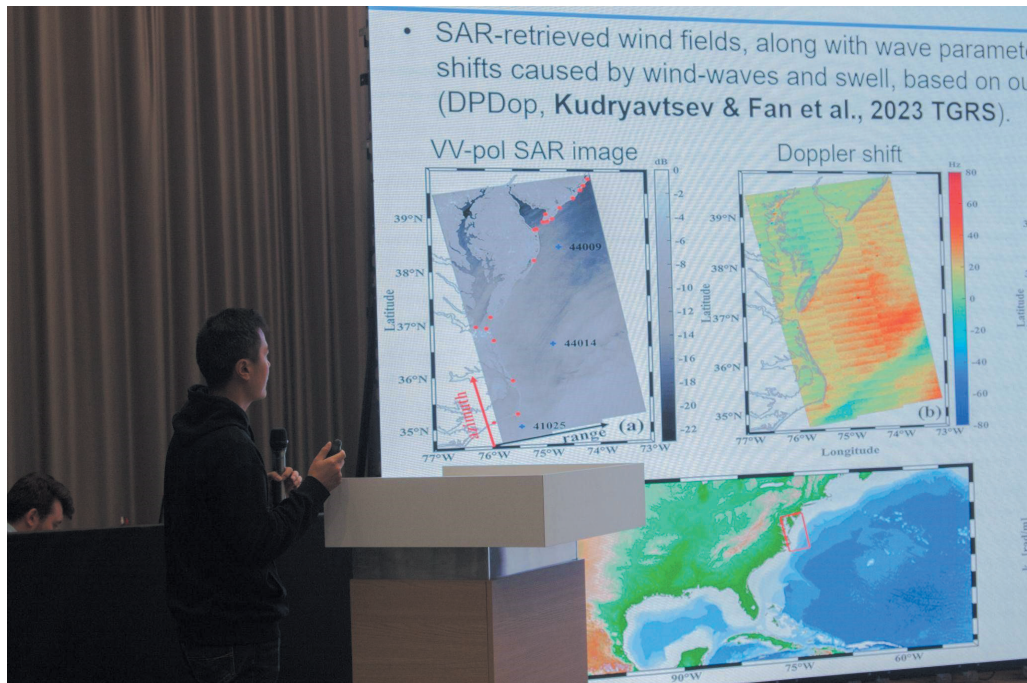


Рис. 3. Презентация пленарного доклада сотрудника Лаборатории спутниковой океанографии Shengren Fan

«Развитие интеграционной платформы *Интерполюс* — секретариат и инициативы *Белый курс*» под руководством А. А. Брыксенкова, руководителя рабочей группы от РФ, полномочного представителя ректора, директора Представительства в Москве.

Во второй день конференции, проходившей в стенах 1 корпуса Российского государственного гидрометеорологического университета (Малоохтинский пр., д. 98), молодые ученые и студенты представили свои работы в секциях «Интеллектуальные геоинформационные системы, мониторинг окружающей среды и методы обработки больших данных» (модератор — д.т.н, профессор кафедры прикладной информатики А. Г. Соколов), «Моделирование и прогнозирование гидрометеорологических процессов, изменения климата и георисков в Арктике» (модератор — д.ф.-м.н., профессор кафедры метеорологических прогнозов С. П. Смышляев) и специальная секция «Молодежная наука для развития Арктического региона РФ» (модераторы — к.т.н., зав. кафедрой инженерной гидрологии Гайдукова Е. В., к.т.н. доцент кафедры прикладной информатики И. А. Мартын).

На конференции присутствовали почетные гости: Иаков, епископ Нарьян-Марский и Мезенский Московского патриархата Русской православной церкви, начальник отдела научно-образовательной работы Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики М. Н. Андреева. В результате работы конференции более 100 молодых ученых и студентов представили свои работы по различным направлениям исследований. Российский государственный гидрометеорологический университет выступил рабочей платформой для обмена опытом среди ученых, лидеров компаний, представителей органов государственной власти и экспертов в области устойчивого экологического, социального и научно-технического развития. Специалисты поделились своими знаниями для реализации научных,



Рис. 4. Участники специальной секции
«Молодежная наука для развития Арктического региона РФ»

академических и социально значимых проектов, способствующих сохранению окружающей среды и борьбе с глобальным изменением климата.

*Заместитель председателя организационного комитета «ИНФОГЕО-2024»,
д.т.н., профессор, директор института
информационных систем и геотехнологий Е. П. Истомин*

*Ответственный секретарь конференции «ИНФОГЕО»,
к.т.н., доцент кафедры прикладной информатики И. А. Мартын*

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 77

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Выход в свет 27.12.2024. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Электронно-сетевое издание. Усл. печ. л. 13,4875. Заказ № 1487.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет



Российский государственный гидрометеорологический университет — федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования. Основан в 1930 г.

В 1994 г. Постановлением Правительства Российской Федерации вузу придан статус Регионального учебного центра Всемирной метеорологической организации.

192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская улица, дом 79, ст. метро «Обводный канал», тел. (812) 712-80-77, www.rshu.ru, E-mail: rshu@rshu.ru