

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 71

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2023

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 71. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГТМУ, 2023. 148 с.

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

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

Редакционный совет:

Чилингаров А. Н., д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН, президент РГТМУ — *председатель совета*

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

Леонтьев Д. В., канд. юрид. наук, проректор по развитию РГТМУ, и.о. проректора по научной работе — *зам. председателя совета*

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Алексеев Г. В., д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Биденко С. И.**, д-р техн. наук, проф.; **Блиновская Я. Ю.**, д-р техн. наук, проф.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вуглинский В. С.**, д-р геогр. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Ермаков Д. М.**, д-р физ.-мат. наук; **Зиновьев А. Т.**, д-р техн. наук; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Костяной А. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Курдявцев 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.; **Поздняков Ш. Р.**, д-р геогр. наук; **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; **Рябченко 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.; **Федорова Н. Ю.**, канд. пед. наук, доцент; **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); **Шукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.

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

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

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

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

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

ISSN 2713-3001

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГТМУ), 2023

© Авторы публикаций, 2023

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

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

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

№ 71

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2023

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 71. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2023. 148 p.

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

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

The Editorial Board:

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

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

Leont'ev D. V., PhD in Juridical Sciences, Vice-Rector for Development, Acting Vice-rector for Research of RSHU — *Vice-Chairman*

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

Editors:

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

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; **Fedorova N. Iu.**, PhD in Pedagogic Sciences, Associate Professor; **Filatov N. N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **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; **Pozdnyakov Sh. R.**, Grand PhD in Geography, 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.

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

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

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

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

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

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

ISSN 2713-3001

The Journal included in the List of the Higher Attestation Commission in the direction of science of the Earth and the environment is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

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

Editorial Office address: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia. Phone: (812) 633-01-88 (421), e-mail: rio@rshu.ru.

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

Содержание

Климатология. Обзор

- Г. В. Алексеев.* Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины 207

Метеорология. Обзор

- А. П. Доронин, В. М. Петроченко, Н. А. Козлова, Г. Г. Щукин, В. В. Филиппёнок.* Искусственные атмосферные облачные образования: обзор исследований 231

Метеорология

- А. Н. Ефременко, Д. М. Караваев, А. Б. Лебедев, Н. О. Моисеева, Г. Г. Щукин.* Совершенствование методики исследований мезоструктуры атмосферных фронтов на основе применения наземной микроволновой радиометрии 249
- Т. А. Шатилина, Г. Ш. Цициашвили, Т. В. Радченкова.* Особенности формирования крупных положительных аномалий температуры воздуха в прибрежных районах Охотского и Японского морей в 1950—2021 гг. 260

Гидрология

- Е. В. Гайдукова, В. Г. Маргарян, И. О. Винокуров, А. Э. Мисакян, М. А. Кулешова.* Прогнозирование расходов воды р. Мармарик (Армения) по уравнению кинематической волны 277

Океанология

- Н. В. Никольский, Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева.* Межгодовая изменчивость температуры поверхности океана в полярных широтах Атлантического океана 293

Геоинформатика

- В. Г. Бурлов, А. В. Переспелов, А. Ю. Миронов, А. Ю. Миронова.* Геоинформационное обеспечение упреждающего управления административной практикой 311

Хроника

- П. И. Бухарицин.* История возникновения и становления зимних плаваний на Нижней Волге и в северной части Каспийского моря 328
- В. Ю. Целев.* О перспективных направлениях развития методов гидрометеорологических наблюдений за снежным и ледовым покровом 335
- Всероссийская научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». 344

Contents

Climatology. Review

- G. V. Alekseev.* Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes. 207

Meteorology. Review

- A. P. Doronin, V. M. Petrochenko, N. A. Kozlova, G. G. Shchukin, V. V. Filippenok.* Artificial atmospheric cloud formations: state and prospects of research. 231

Meteorology

- A. N. Efremenko, D. M. Karavaev, A. B. Lebedev, N. O. Moiseeva, G. G. Schukin.* Improvement of research methodology mesostructures of atmospheric fronts on the basis of ground-based microwave radiometry 249
- T. A. Shatilina, G. Sh. Tsitsiashvili, T. V. Radchenkova.* Feature of the formation of major positive air temperature anomalies in the coastal areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan in 1950—2021 260

Hydrology

- E. V. Gaidukova, V. G. Margaryan, I. O. Vinokurov, A. E. Misakyan, M. A. Kuleshova.* Forecasting water discharges of the river Marmarik (Armenia) according to the kinematic wave equation 277

Oceanology

- N. V. Nikolskii, Y. V. Artamonov, E. A. Skripaleva.* Interannual variability of sea surface temperature at the polar latitudes of the Atlantic Ocean 293

Geoinformatics

- V. G. Burlov, A. V. Perespelov, A. Y. Mironov, A. Y. Mironova.* Geoinformation support for proactive management of administrative practice 311

- Chronicle**. 328

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 207—230.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):207—230.

КЛИМАТОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья
УДК [551.501+551.583:001.891.57](98)
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-207-230

Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины

Генрих Васильевич Алексеев

ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия, alexgv@aari.ru

Аннотация. Глобальные модели климата используются для предсказания антропогенных изменений климата и планирования на этой основе социально-экономической деятельности в изменяющихся климатических условиях. В тоже время отмечаются расхождения между модельными проекциями и наблюдаемыми изменениями климата, особенно в низких широтах и полярных областях. Одной из причин сохраняющихся расхождений может быть недостаточное внимание к естественным воздействиям на климатическую систему. Поэтому исследования роли естественных факторов в развитии современного потепления актуальны для повышения надёжности прогнозов развития климатической обстановки на Земле, на основе которых планируются глобальные социально-экономические преобразования.

Ключевые слова: глобальные модели климата, Арктика, потепление, низкие широты, инсоляция
Благодарности. Расчёты на избранных глобальных моделях климата предоставлены Климатическим центром Росгидромета на базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Войкова и обработаны научным сотрудником ГГО В. А. Говорковой.

Для цитирования: Алексеев Г. В. Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 207—230. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-207-230.

CLIMATOLOGY. REVIEW

Original article

Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes

Genrikh V. Alekseev

FSBI “AARI”, Saint Petersburg, Russia, alexgv@aari.ru

Summary. Global climate models are used to predict anthropogenic climate change and to plan social and economic activities under changing climatic conditions. At the same time, there are discrepancies

between model projections and observed climate changes, especially in low latitudes and polar regions. One reason for the discrepancy may be insufficient attention to natural forcings on the climate system. Therefore, studies of the role of natural factors in the development of modern warming are relevant for improving the reliability of forecasts for the development of the climatic situation on Earth. Particular attention is paid to the impact of climate change in low latitudes on the Arctic. A significant contribution to these changes can be made by a long-term increase in low-latitude insolation. Most of the low latitudes are occupied by the ocean, which absorbs the bulk of the incoming solar radiation. The contribution of the increase in insolation to the increase in ocean surface temperature at low latitudes is estimated from the available data on insolation of the upper boundary of the atmosphere. The changes in SST at low latitudes are compared according to reanalysis data and calculations of global climate models. Comparison of climate changes in low latitudes and in the Arctic is made. The influence from low latitudes on the reduction in the area of sea ice and the increase in water temperature in the Arctic basin is estimated. Changes in the characteristics of the atmosphere and ocean at low latitudes, associated with an increase in insolation, after 3 years are manifested in changes in the characteristics of the climate and sea ice in the Arctic. This indicates the potential for improved global modeling of warming in the Arctic and at low latitudes when taking into account slow changes in radiative forcing at the upper boundary of the atmosphere due to the Earth's orbital dynamics. Insolation trends at low latitudes are maximum in spring, i.e., in the vicinity of the vernal equinox in the Earth's orbit. This indicates the influence of precession — a slow shift of the equinox point, when the influx of solar radiation to low latitudes is maximum, to the perihelion, where it will be 3 W/m² more.

Keywords: Global climate models, Arctic, warming, low latitudes, insolation

Acknowledgments. Calculations on selected global climate models were provided by the Climate Center of Roshydromet on the basis of the Main Geophysical Observatory. A. I. Voeikov and processed by the MGO researcher V. A. Govorkova

For citation: Alekseev G. V. Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):207—230. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-207-230.

Введение

Глобальные численные модели климатической системы Земли являются основным инструментом для получения количественных оценок изменений климата, вызванных антропогенной деятельностью [1]. Новые результаты расчётов на моделях регулярно обсуждаются и обобщаются в оценочных отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Выпуску отчётов предшествует анализ численных экспериментов, выполненных в соответствии с согласованным списком на глобальных моделях для ансамбля CMIP6. Предыдущий ансамбль расчетов CMIP5 использовался при подготовке отчета IPCC, выпущенного в 2013 году. С тех пор модели были усовершенствованы с учетом рекомендаций, основанных на анализе расчетов CMIP5. Первые расчеты для нового ансамбля показали более высокую равновесную чувствительность к удвоению концентрации CO₂ относительно доиндустриального уровня по сравнению с моделями CMIP5 [2], что пока не нашло объяснения.

Изменения, зафиксированные в ледяных кернах, не подтверждают столь высокую чувствительность климата. Ранее большинство моделей прогнозировали потепление, ожидаемое при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере в два раза по сравнению с доиндустриальными временами — между 2 °C и 4,5 °C. Но многие из новых моделей от ведущих центров показали потепление более чем на 5 °C [3] и прогнозируют слишком быстрые темпы потепления. Расчёты

похолодания в последнем ледниковом периоде 20000 лет назад на новой модели NCAR при заданном низком уровне CO_2 показали вдвое более низкую температуру по сравнению с данными палеоклиматических записей в результате высокой чувствительности модели к изменениям концентрации CO_2 . Тем не менее чувствительные модели хорошо воспроизводят климат в целом, лучше, чем их предшественники, поэтому разработчики моделей рекомендуют не заикливаясь на чрезмерной чувствительности моделей, а использовать модельные расчёты для практических целей.

В феврале 2020 года в Гамбурге, состоялся семинар ВПИК [4], на котором обсуждались научные вопросы на следующее десятилетие и пробелы в знаниях, которые следует учитывать при подготовке отчетов МГЭИК. Среди проблем, выделенных на ближайшее десятилетие, была чувствительность климата к выбросам парниковых газов и последствия потепления, превышающие уровни, указанные в Парижском соглашении. Отмечены погрешности модельных оценок, а также то, что в некоторых областях остаются те же проблемы, что и двадцать лет назад. Отмечено, что глобальные модели — инструмент, который можно использовать в сочетании с другими инструментами, при этом следует применять различные методы оценки.

Глобальные модели климата, настроенные на антропогенное потепление, оказываются не в состоянии воспроизвести наблюдаемые крупные аномалии климата. В июне 2021 года над северо-западом Тихого океана и прилегающей сушей Северной Америки сформировалась экстремальная аномалия с температурой воздуха до $49,6\text{ }^\circ\text{C}$, что привело к гибели от перегрева более 1000 человек. Попытки воспроизвести аномалию в экспериментах с глобальными моделями оказались неэффективным и привели к выводу, что антропогенное потепление не вызывает подобных аномалий [5]. К подобному заключению пришли также авторы статьи [6], отметившие, что климатические модели не отражают наблюдаемое усиление зональной циркуляции в Северной Атлантике как реакцию на антропогенные выбросы. Ранее анализ модельных расчетов из ансамбля CMIP5 [7] показал, что модели недооценивают величину наблюдаемой междекадной изменчивости и искажают ее пространственный характер.

Обращает на себя внимание недооценка в моделях положительных тенденций потепления океана в низких широтах, где аккумулируется большая часть тепла солнечной радиации [8—11]. В результате глобальные совместные модели воспроизводят особенности изменения климата в отдельных регионах средних и высоких широт с меньшей достоверностью, чем модели атмосферной циркуляции с наблюдаемым потеплением в тропических океанах [12—14]. Причины несоответствия между моделируемым и наблюдаемым потеплением заключаются в том, что некоторые важные процессы в тропиках не учитываются в совместных моделях [13] или модели недооценивают внутреннюю изменчивость [10].

Целью статьи является исследование причин расхождений между наблюдаемыми и моделируемыми изменениями климата Арктики и поиск путей их уменьшения, учитывая роль естественных факторов в развитии современного потепления

Арктика в глобальных моделях климата

В новом поколении глобальных моделей из СМIP6 наибольшее расхождение сохраняется между наблюдаемым и смоделированным распределением морского льда в Арктике в сентябре, которое увеличивается с начала XXI века. Большинство моделей СМIP6 показывает меньшую потерю льда в сентябре на градус потепления по сравнению с наблюдениями [15]. Большинство моделей СМIP6 недооценивает наблюдаемую среднюю температуру в Арктике с 1979 г. по 2014 г. В 22 моделях из ансамбля СМIP6 наибольшие смещения модельной температуры воздуха наблюдаются над Норвежским, Баренцевым и морями, что связано с недооценкой в моделях океанического переноса тепла из Атлантики [16]. Глобальные совместные модели в значительной степени недооценивают межгодовую изменчивость температуры в слое атлантических вод Северного Ледовитого океана и повышение температуры, наблюдаемое здесь с конца 1970-х годов [17].

Современные климатические модели показывают большой разброс прогнозируемого сокращения площади морского льда в XXI веке [18]. Для прогнозов сентябрьского льда в Арктике внутренняя изменчивость составляет до 60 % общей неопределенности в следующие несколько десятилетий. В зимнее время в Гренландском и Баренцевом морях внутренняя изменчивость площади морского льда составляет до 70 % от общей неопределенности его прогностических оценок. Необходимо улучшение представления в моделях внутренней изменчивости арктического морского льда для сокращения неопределенности в будущих прогнозах [19].

Модели климата используются для исследования влияния потепления в Арктике на погоду и климат средних широт. В статье [20] и многих других доказывалось такое влияние. Сомнения в возможности арктического потепления вызвать значимые изменения в средних широтах приводятся в других статьях (например, [21—27]). В обзоре публикаций о влиянии арктического усиления на зимние похолодания в средних широтах, насчитывающем 203 ссылки [28], отмечается, что расхождения в выводах между модельными исследованиями и наблюдениями затрудняют понимание того, как арктическое усиление потепления влияет на погоду в средних широтах.

Задавая аномалии сплоченности морских льдов в Арктике, в моделях получают реакцию климата не только в средних, но и в низких широтах, что может быть следствием обратимости модельного климата, поскольку в модели можно поменять местами причину и следствие. В статьях [29, 30] на основе моделирования получены противоположные выводы о влиянии тихоокеанского колебания на потепление в Арктике. Эти примеры подтверждают необходимость анализа не только результатов глобальных моделей, но и рядов наблюдений исходя из физических представлений о связи между ними.

Причины потепления в Арктике

В работах [31—34] был установлен основной вклад атмосферного переноса тепла в энергетический баланс Арктики в холодную половину года. Расчёты переносов атмосферного тепла и влаги в Арктику по данным реанализа ERA Interim

за 1980—2015 гг., показали [35], что основная часть явного и скрытого тепла поступает в Арктику к северу от 70° с.ш. зимой между 0° и 80° в.д. и между поверхностью и 750 гПа. Этот приток определяет более 50 % изменчивости зимней температуры воздуха и более 40 % средней за год, а приток водяного пара усиливает парниковый эффект, который замедляет рост толщины льда зимой и ускоряет начало таяния [36, 37].

Изменчивость атмосферного переноса тепла в Арктику обусловлена изменением атмосферной циркуляции в северном полушарии [38—41]. Эти изменения, в частности, являются результатом воздействия аномалий температуры поверхности океана на интенсивность атмосферной циркуляции [13, 22, 42, 43]. Влияние аномалий ТПО в низких широтах особенно важно, поскольку здесь аккумулируется большая часть притока тепла от Солнца и от глобального потепления [44, 45], которое переносится в средние и высокие широты. Аномалии ТПО в тропиках усиливают конвекцию в атмосфере, что сопровождается усилением и расширением циркуляционной ячейки Хэдли [46—51], порождают волны Россби [41, 52—55] и колебания Маддена—Джулиана [56], влияют на Североатлантическое колебание [57]. В результате увеличивается перенос тепла и влаги в высокие широты. Перечисленные результаты получены при изучении влияния ТПО на атмосферные циркуляционные структуры в низких широтах, проявляющегося в Арктике через 2—3 недели.

ТПО в тропической Атлантике воздействует не только на атмосферный, но и на океанский перенос тепла в приатлантические арктические моря и в Арктический бассейн [58].

Приток теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Баренцево и Гренландское моря влияет на потепление и сокращение площади морского льда зимой [26, 59—61]. Увеличение притока и повышение температуры поступающей атлантической воды повлияло на структуру водных масс в Арктическом бассейне. Переход произошёл в 1990-е годы и сопровождался, в частности, уменьшением содержания пресной воды (СПВ) в евразийской и ростом в амеразийской частях Арктического бассейна, согласующимися с притоками пресной воды с речным стоком, осадками и таянием/замерзанием [62, 63].

Влияние ТПО в низких широтах на переносы в Арктику осуществляется посредством общей циркуляции атмосферы и циркуляции океана в Северной Атлантике. Начальным воздействием является формирование роста ТПО, вызывающее усиление меридиональных переносов в атмосфере, а в Атлантическом океане — увеличение океанического переноса тепла. В результате через 2,25 года отмечается рост температуры воды в Баренцевом море и увеличение зимних атмосферных переносов тепла через «атлантические ворота» на 70° с.ш., зимней температуры воздуха и сокращение площади морского льда в приатлантической Арктике [64, 65].

Установлена [65] тесная связь изменений толщины и объёма льда в Арктическом бассейне зимой с нисходящей длинноволновой радиацией, управляемой ростом приповерхностной температуры воздуха и содержания водяного пара, которые, в свою очередь, связаны с изменением температуры и содержанием водяного пара осенью на 27—32 месяца ранее в области 0 — 25° с.ш., формирующихся с участием инсоляции (рис. 1).

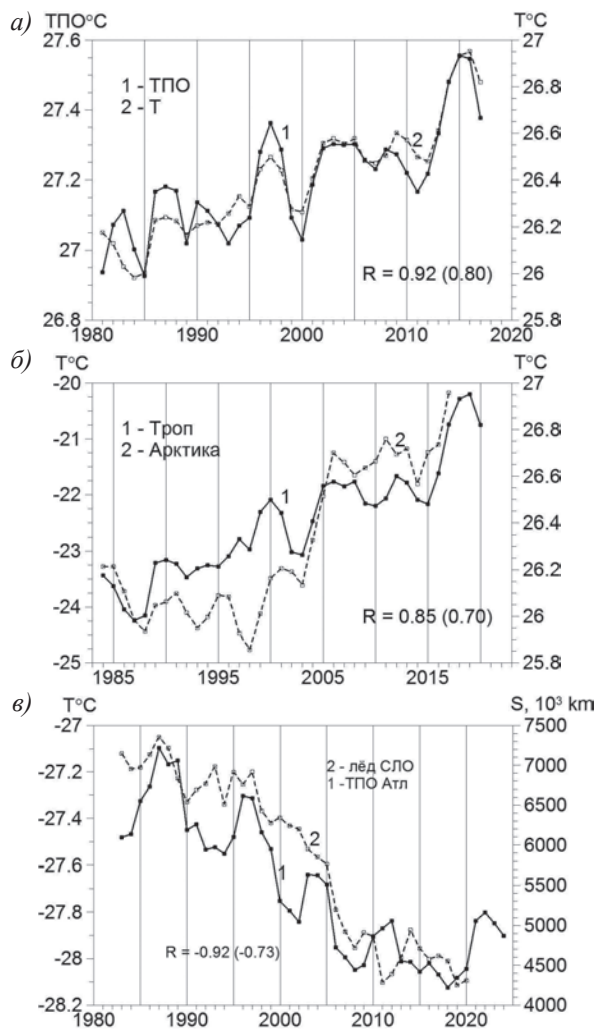


Рис. 1. Влияние ТПО в тропиках на приповерхностную температуру и морской лёд в Арктике.

- а) ТПО в августе в области 10° юш.—10° с.ш. и ПТВ в области (0–25° с.ш.) в октябре;
 б) ПТВ в области (0–25° с.ш.) в октябре и в области (70–87.5° с.ш.) зимой через 3 года;
 в) ТПО в тропической Атлантике в октябре и ледовитость (площадь, занятая морским льдом) в СЛО в сентябре через 4 года. Все ряды сглажены скользящим усреднением по 3 года. R — коэффициенты корреляции между рядами (1) и (2), в скобках — между несглаженными рядами.

Fig. 1. Impact of SST in the tropics on surface air temperatures (SAT) and sea ice in the Arctic.

- а) SST in August in the area of 10° S—10° N and SAT in the region (0–25°N) in October;
 б) SAT in the region (0–25°N) in October and in the region (70–87.5°N) in winter after 3 years;
 в) SST in the tropical Atlantic in October and sea ice extent (the area occupied by sea ice) in the Arctic Ocean in September after 4 years. All series are smoothed by moving average over 3 years. R — correlation coefficients between series (1) and (2), in brackets — between unsmoothed series.

Рост инсоляции в низких широтах

В низких широтах находятся климатические области максимальной температуры воздуха, максимальной ТПО и максимального содержания водяного пара в атмосфере, которым соответствует наибольший приток солнечной радиации. Здесь накапливается основная часть тепла, поглощаемого океаном [66].

Инсоляция на верхней границе атмосферы здесь растёт с января по июль [67—70]. Эти тренды инсоляции в результате орбитальной динамики Земли малы, но их влияние усиливается за счет накопления тепла в океане, который составляет большую часть области низких широт, малого альбеда поверхности океана и нелинейных обратных связей между температурой, содержанием водяного пара и нисходящим длинноволновым излучением. Наши расчёты по данным об инсоляции [71] показали (рис. 2), что тренды инсоляции в низких широтах максимальны весной, т.е. в окрестности точки весеннего равноденствия на орбите Земли. Это указывает на влияние прецессии — медленного смещения точки равноденствия, когда приток солнечной радиации в низкие широты максимален, к перигелию, где будет на 3 Вт/м^2 больше приходиться солнечной радиации в низкие широты.

Помимо трендов в инсоляции в низких широтах содержатся колебания, близкие к тем, что присутствуют в спектрах изменчивости параметров океана и атмосферы (рис. 3, а). Своим происхождением эти колебания обязаны вариациям расстояния между Землей и Солнцем (рис 3, б).

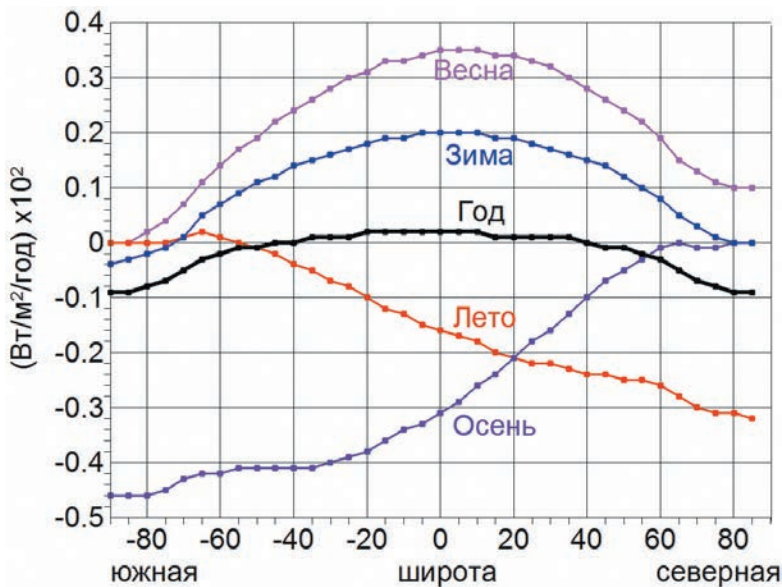


Рис. 2. Тренды инсоляции на верхней границе атмосферы за 1979—2018 гг.

Fig. 2. Trends in insolation of the upper boundary of the atmosphere for 1979—2018.

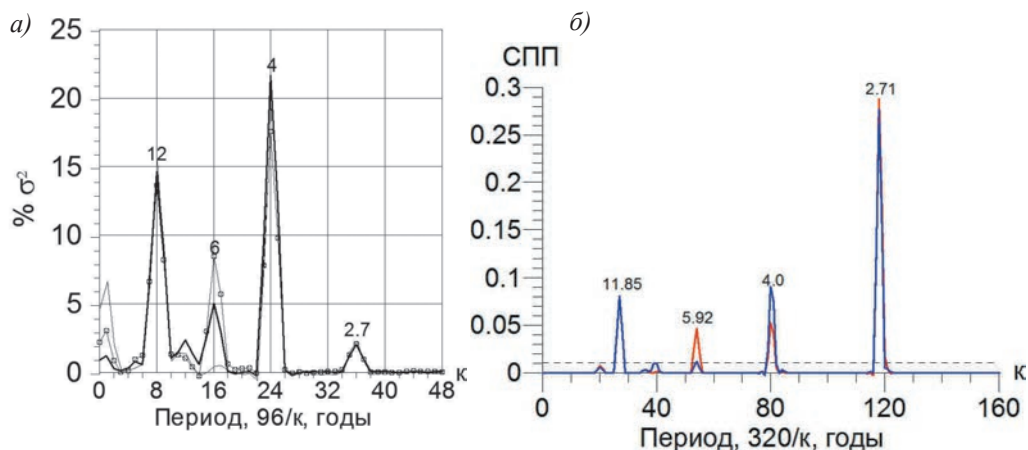


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний инсоляции в низких широтах и расстояния между Землей и Солнцем.

а) Спектральная плотность (СПП) инсоляции весной (жирная линия) и в марте, апреле, мае и зимой (тонкие линии) 1900—2017 гг.; б) СПП изменений расстояния между Землей и Солнцем зимой (синий) и летом (красный) за 500 лет по расчётам Е. В. Питьевой из Института прикладной астрономии РАН (<https://iaaras.ru/people/pitjeva/>).

Fig. 3. Spectral densities of insolation fluctuations at low latitudes and distances between the Earth and the Sun.

а) Spectral density (SPD) of insolation in spring (thick line) and in March, April, May and winter (thin lines) 1900—2017; б) SPD of changes in the distance between the Earth and the Sun in winter (blue) and summer (red) for 500 years according to the calculations of E. V. Pitjeva from the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (<https://iaaras.ru/people/pitjeva/>).

СПП рассчитаны по алгоритму:

$$СПП(\kappa) = \frac{\delta(\kappa)}{m} \left\{ \hat{R}_0 + \sum_1^m R_z \cos \frac{\pi \kappa \tau}{m} \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right) \right\},$$

$$\delta(\kappa) = \begin{cases} \frac{1}{2}, \kappa = 0, m \\ 1, 0 < \kappa < m \end{cases},$$

где R — нормированная автокорреляционная функция, $\cos \frac{\pi \kappa \tau}{m} \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right)$ — ядро Тьюки.

Описание алгоритма можно найти в книге [72]. Использование ядра Тьюки позволяет представить часть дисперсии в «κ»-полосе. Всего полос «m» — по числу использованных значений автокорреляционной функции, которые задаются исходя из желаемого разрешения спектра и требования статистической надёжности оценки.

На рис. 3 оценки СПП безразмерны, поскольку автокорреляционная функция нормирована на дисперсию и дают распределение единичной дисперсии в процентах на рис. 3 а и в долях единицы на рис. 3 б. Чтобы получить размерные оценки, нужно умножить на дисперсию (σ^2). Переход от условной частоты « k » к периоду T_k осуществляется по формуле $T_k = 2m/k$, поскольку интервал частот спектра равен $(0, 1/2\Delta t)$, где Δt — дискретность ряда, число частотных полос — $1/2m$ ($\Delta t = 1$), а $k/2m$ — k полоса частот, которой соответствует период $T_k = 2m/k$.

Спектр изменений расстояния между Солнцем и Землей и спектр изменений инсоляции совпадают частично, поскольку инсоляция изменяется не только в результате изменений расстояния, но и других параметров планетарной динамики Земли (нутации, прецессии и др.). В частности, в спектре инсоляции присутствует период 18,6 года в результате изменений угла наклона Земли под влиянием Луны [69]. В изменениях расстояния более длительные чем 12 лет периоды, в частности 60 лет, не проявляются.

Тренды инсоляции низких широт малы. В сумме тренды за январь — август — месяцы, предшествующие максимуму ПТВ, составляют $0,0156 \text{ Вт/м}^2$.

В работе [73] найдена высокая корреляция между инсоляцией весной и поверхностной температурой воздуха, температурой поверхности воды, содержанием водяного пара, нисходящей длинноволновой радиацией осенью в низких широтах. Такую связь можно объяснить кумулятивным эффектом притока инсоляции на поверхность океана, формирующим осенний максимум ТПО. Изменения характеристик атмосферы и океана в низких широтах, связанные с изменениями инсоляции, через 3 года проявляются в изменениях характеристик климата и морских льдов в Арктике [58, 74, 75].

Оценку вклада роста инсоляции в повышение ТПО можно получить из анализа линейной чувствительности климатических параметров. Использование понятия «чувствительность» в климатических исследованиях предложено Г. С. Голицыным и И. И. Моховым [76, 77]. В общем случае чувствительность — реакция линейной системы на малое изменение на входе. В климатологии чувствительность оценивают коэффициентом регрессии между исследуемыми параметрами. В случае сравнения двух гармонических колебаний (например, сезонного хода двух параметров климатической системы) можно использовать в качестве чувствительности амплитудно-частотную характеристику — отношение амплитуды сигнала на выходе системы к амплитуде сигнала на входе. Здесь определим чувствительность (Sn) по отношению амплитуд (A) сезонного хода параметров y и x :

$$Sn_x^y = \frac{A_y}{A_x}. \quad (1)$$

Вклад роста параметра X в тренд параметра Y будет:

$$\Delta Tr Y = Sn_x^y \times Tr X. \quad (2)$$

В табл. 1 и 2 представлены рассчитанные по формулам (1) и (2) взаимные чувствительности и вклады в тренд соответствующих параметров.

Таблица 1

Оценки чувствительности по амплитуде сезонных изменений —
отношение амплитуды параметра в верхней строке к амплитуде параметра
в первом столбце с соответствующим отношением размерностей

Sensitivity estimates for the amplitude of seasonal changes are the ratio
of the amplitude of the parameter in the top row to the amplitude of the parameter
in the first column with the corresponding ratio of dimensions

	CO ₂ , ppm	TCVW, Kgm ⁻²	STRD, Wm ⁻²	SST, °C
Ins, Wm ⁻²	0,046	0,173	0,346	0,0323
CO ₂ , ppm	—	3,768	7,522	0,703
TCVW, Kgm ⁻²	—	—	1,996	0,187
STRD, Wm ⁻²	—	—	—	0,0934

Таблица 2

Вклад в тренд параметров в верхней строке тренда параметров в первом столбце,
найденный по чувствительности из табл. 1 и тренду

The contribution to the trend of the parameters in the top line of the trend of the parameters
in the first column, found by the sensitivity from Table 1 and the trend

	CO ₂ , ppm	TCVW, Kgm ⁻²	STRD, Wm ⁻²	SST, °C
Ins, Wm ⁻²	—	0,0028 (4 %)	0,0054 (2,6 %)	—
CO ₂ , ppm	—	6,745	14,367	1,343
TCVW, Kgm ⁻²	—	—	0,1343 (66 %)	0,0126 (55 %)
STRD, Wm ⁻²	—	—	—	0,019 (83 %)

Примечание. В табл. 1 и 2: Ins — инсоляция на верхней границы атмосферы по [71], CO₂ — концентрация по [78] в области 0—25° с.ш., TCWV — общее содержание водяного пара, STRD — нисходящая ДВ радиация на поверхности по ERA5, SST — температура поверхности океана в области 5—25° с.ш., 20—60° з.д. по HadISST. Используются данные за 1979—2018 гг.

In table 1 and 2: Ins — insolation of the upper boundary of the atmosphere according to [71], CO₂ — concentration according to [78] in the region of 0—25° N, TCWV — total water vapor content, STRD — descending DW radiation on the surface according to ERA5, SST is the ocean surface temperature in the area 5—25°N, 20—60°W. by HadISST. Data for 1979—2018 are used.

Из табл. 1 и 2 следует, что чувствительность климатических параметров в рассматриваемой области низких широт к росту CO₂ нереально велика — вклад роста в тренд климатических параметров (табл. 2) превышает 5000 %. Вклад роста содержания водяного пара (TCWV) в нисходящую ДВ радиацию (STRD) составляет 66 %. Оставшиеся 34 % тренда STRD можно отнести на счёт роста CO₂, на которые придётся 28 % тренда SST. Таковую же оценку (28 %) вклада CO₂ в тренд SST получим из разности вкладов STRD (83 %) и TCWV (55 %). Оставшиеся 17 % можно отнести на счёт приближенности оценок.

Чувствительность климатических параметров к росту инсоляции мала, поэтому прямой вклад инсоляции в их рост не превышает 4 %. Но незначительный рост инсоляции приводит к значимым изменениям климатических параметров с участием нелинейной зависимости уходящей и падающей ДВ радиации и

концентрации водяного пара от температуры в низких широтах. Учёт нелинейных зависимостей в расчётах, выполненных в работе [73], показал вклад роста инсоляции в тренд SST равным 57 %, близким к 55 % вклада вследствие роста общего содержания водяного пара, полученным из табл. 2.

Оценки в табл. 1 и 2 показывают, что основной вклад в рост ТПО (83 %) в рассматриваемой низкоширотной области Северной Атлантики вносит нисходящая ДВ-радиация. Рост нисходящей ДВ-радиации формируется за счёт увеличения содержания водяного пара (55 %) и повышения концентрации CO_2 (28 %). Ранее в работе [73] получено, что повышение содержания водяного пара в атмосфере низких широт вследствие незначительного роста инсоляции обеспечивает 57 % повышения ТПО в этой же области Северной Атлантики. Близость двух независимых оценок вклада содержания водяного пара в повышение ТПО подтверждает влияние малого повышения инсоляции в формирование тренда ТПО в низких широтах и указывает на возможную причину расхождений с оценками роста ТПО в расчётах глобальных моделей.

В радиационном атмосферном блоке глобальных моделей детально учитываются распространение вертикальных потоков радиации в атмосфере, но не содержится сведений о расчёте распределения солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы [1]. В обзоре [79] показано, что в радиационном блоке глобальных моделей CMIP6 солнечное воздействие представлено полной солнечной радиацией (TSI), солнечной спектральной освещённостью (SSI) и индексом F10.7, а также воздействием частиц, включая геомагнитные индексы Ap и Kp, скоростью ионизации для учёта эффектов солнечных протонов, электронов и галактических космических лучей. Данные о солнечном воздействии представлены с дневным и месячным разрешением для исторического (1850—2014 гг.) и будущего (2015—2300 гг.) моделирования. Для доиндустриального моделирования учтены 11-летние и более короткие временные масштабы изменчивости солнечного воздействия, но без долгосрочных изменений. Об учёте долговременных изменений в распределении солнечного воздействия на верхней границе атмосферы, связанных с орбитальной динамикой Земли не упоминается ввиду априори принятого положения об их малости даже в сравнении с влиянием космических лучей.

Для сравнения инсоляции на верхней границе атмосферы низких широт в глобальных моделях и в расчётах Фёдорова и Костина [71]) были выбраны 7 моделей (табл. 3) с наименьшими среднеквадратическими ошибками с климатом в ERA5 и HadISST.

Если сезонные изменения инсоляции с максимумом в мае и минимумом в декабре в разных моделях и в расчётах Фёдорова и Костина (ФК) близки между собой, то многолетние тренды за 1979—2018 гг. среднемесячных значений инсоляции на верхней границе атмосферы показывают большой разброс между моделями и отличия от расчётов по данным ФК (рис. 4). При этом в большинстве моделей отсутствует тренд инсоляции на верхней границе атмосферы низких широт в отличие от тренда инсоляции в расчётах по данным Фёдорова и Костина с максимумом в апреле.

Совместные модели* циркуляции атмосферы и океана из CMIP5
 Joint Atmospheric-Ocean Circulation Models* from CMIP5

№	Центр, страна	Название модели, год создания	Модель общей циркуляции атмосферы (разрешение)	Модель общей циркуляции океана (разрешение)
1	CCCMA, Канада	CanESM2, 2010	T63 (1.9° × 1.9°) L35	CanOM4(~0.7° × ~0.9°) L40 256×192
2	NCAR, США	CESM1-BGC, 2010	f09_g16(1.25° × 0.9°) L27 288×192	POP2(1.1° × 0.3~0.6°) L60, 320×384
3	NCAR, США	CCSM4, 2010	f09_g16(1.25° × 0.9°) L27, 288×192	POP2(1.1° × 0.3~0.6°) L60, 320×383
4	CMCC, Италия	CMCC-CM, 2009	T159(0.75° × 0.75°) L31 480×240	ORCA2(2.0° × 0.5~2°) L31, 182×149
5	INM, Россия	INM CM4, 2009	(2.0° × 1.5°) L21	R1×(1.0°-0.5°) L40 360×340
6	AORI/NIES/JAMES&T, Япония	MIROC5, 2010	T85L40(1.4° × 1.4°) L40 256×128	COCO4.5R(1.4° × 0.5°) L50 256×224
7	MPI, Германия	MPI-ESM-MR, 2009	T63 (1.9° × 1.9°) L95	MPIO TP04(~0.4° × 0.4°) L40 802×404

* Расчёты на выбранных моделях предоставлены Климатическим центром Росгидромета в базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова и обработаны В. А. Говорковой.

* Calculations on the selected models were provided by the Climate Center of Roshydromet in the database of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov and processed by V. A. Govorkova.

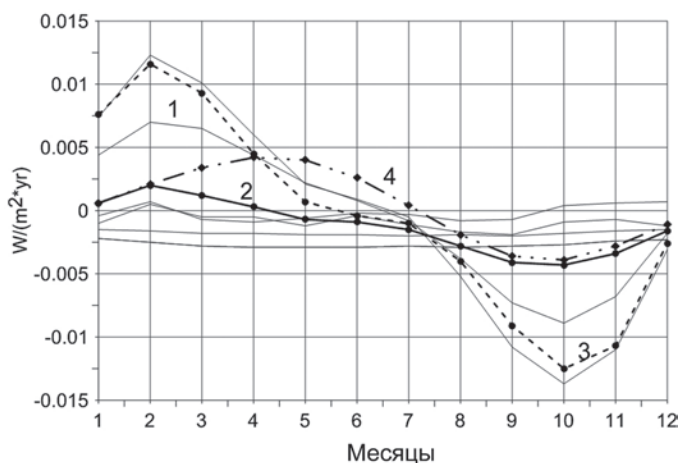


Рис. 4. Тренды инсоляции на верхней границе атмосферы в 7 глобальных моделях CMIP5 (из табл. 3), в ERA5, в данных из <http://www.solar-climate.com>.

1 — тренды в отдельных моделях, 2 — средний тренд по 7 моделям, 3 — тренд в ERA5, 4 — тренд по данным ФК.

Fig. 4. Trends in insolation of the upper boundary of the atmosphere in 7 global CMIP5 models (from Table 3), in ERA5, in data from <http://www.solar-climate.com>.

1 — trends in individual models, 2 — average trend for 7 models, 3 — trend in ERA5, 4 — trend according to data FK.

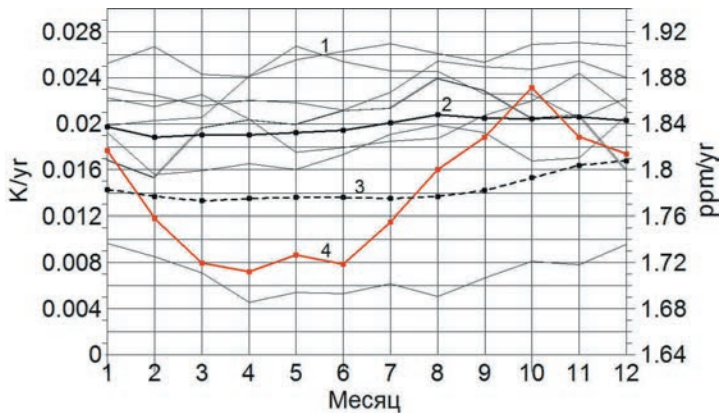


Рис. 5. Тренды среднемесячных значений ТПО и CO_2 в выбранном районе тропической Северной Атлантики ($5\text{--}25^\circ$ с.ш.; $60\text{--}10^\circ$ з.д.) за 1979—2018 гг.

1 — тренды смоделированной ТПО; 2 — средний тренд по 7 моделям; 3 — тренд CO_2 ; 4 — тренд ТПО по данным HadISST. Тренды отдельных моделей показывают межмодельный разброс.

Fig. 5. Trends in monthly average SST and CO_2 values in a selected area of the tropical North Atlantic ($5\text{--}25^\circ\text{N}$; $60\text{--}10^\circ\text{W}$) for 1979—2018.

1 — trends in the simulated SST; 2 — average trend for 7 models; 3 — CO_2 trend; 4 — SST trend according to HadISST data. Trends of individual models show inter-model scatter.

Тренды среднегодовой инсоляции на верхней границе атмосферы области $0\text{--}25^\circ$ с.ш. во всех моделях и в ERA5 отрицательны в отличие от рассчитанной по ФК. В четырёх моделях тренды инсоляции во все месяцы отрицательны. В модели СМСС-СМ (Италия) тренды положительны с января по июнь с максимумом в марте и близким к нему значением в апреле. Таким образом, во всех рассмотренных моделях присутствует разный форсинг от многолетних изменений инсоляции на верхней границе атмосферы, который к тому же уменьшается в отличие от инсоляционного форсинга в расчётах по ФК.

Ни в одной из рассмотренных моделей не получено близкого к HadISST распределения трендов ТПО в выбранном районе тропической Северной Атлантики с максимумом в октябре, а все модельные тренды близки к распределению трендов CO_2 (рис. 5).

Тренды среднемесячных значений приповерхностной температуры воздуха, общего содержания водяного пара в атмосфере и нисходящей длинноволновой радиации на поверхности в области низких широт в моделях также показывают большой разброс, а тренды средних по семи моделям превосходят тренды этих параметров по данным ERA5.

Заключение

Исследования роли естественных факторов в развитии современного потепления актуальны для повышения надёжности прогнозов развития климатической

обстановки на Земле, на основе которых планируются глобальные социально-экономические преобразования. Обострение социально-экономических последствий глобального потепления требует принятия адекватных мер, зависящих от надежных установленных причин и механизмов потепления.

В настоящее время основным инструментом для получения количественных оценок изменений климата служат глобальные численные модели климатической системы Земли, а главной причиной изменений считается рост содержания CO_2 , вызванный антропогенной деятельностью. В тоже время отмечаются расхождения между модельными проекциями и наблюдаемыми изменениями климата, особенно в низких широтах и полярных областях, которые остаются, несмотря на развитие моделей. Одной из причин сохраняющихся расхождений может быть недостаточное внимание к неантропогенным (естественным) воздействиям на климатическую систему.

Расчеты изменений климата для ансамбля CMIP6 показали более высокую равновесную чувствительность к удвоению концентрации CO_2 относительно доиндустриального уровня по сравнению с моделями из предыдущего ансамбля CMIP5.

Глобальные модели климата, настроенные на антропогенное потепление, оказываются не в состоянии воспроизвести наблюдаемые крупные аномалии климата и не отражают наблюдаемое усиление зональной циркуляции в Северной Атлантике.

Привлекает внимание и недооценка в глобальных моделях положительных тенденций потепления океана в низких широтах, где аккумулируется большая часть тепла солнечной радиации. В результате глобальные совместные модели воспроизводят особенности изменения климата в отдельных регионах средних и высоких широт с меньшей достоверностью, чем модели атмосферной циркуляции с заданным наблюдаемым потеплением в тропических океанах. Тем не менее, глобальные модели из CMIP6 хорошо воспроизводят климат в целом лучше, чем их предшественники, поэтому разработчики моделей рекомендуют использовать модельные расчёты для практических целей.

В новом поколении глобальных моделей из CMIP6 наибольшее расхождение сохраняется между наблюдаемым и смоделированным распределением морского льда в Арктике в сентябре. Большинство моделей показывают меньшую потерю льда в сентябре на градус потепления по сравнению с наблюдениями и недооценивают наблюдаемую среднюю температуру в Арктике, особенно над Норвежским, Баренцевым и Карским морями, и повышение температуры в слое атлантических вод Северного Ледовитого океана, что связано с недооценкой в моделях океанического переноса тепла из Атлантики.

Модели климата используются как для доказательства влияния усиления потепления в Арктике на погоду и климат средних широт, так и для противоположного утверждения о малости или отсутствии такого влияния. Во многом это связано с обратимостью — в модели можно поменять местами причину и следствие. В результате Арктика оказывает влияние на аномалии в низких широтах. Это подтверждает необходимость планирования расчётов на глобальных моделях

на основе физических представлений о природе климатических процессов и связей между ними.

Основная часть явного и скрытого тепла зимой в Арктику к северу от 70° с.ш. поступает между 0° и 80° в.д. и определяет более 50 % изменчивости зимней температуры воздуха и более 40 % средней за год, а приток водяного пара усиливает парниковый эффект, который замедляет рост толщины льда зимой и ускоряет начало таяния. Изменения притока, в частности, являются результатом воздействия аномалий температуры поверхности океана на интенсивность атмосферной циркуляции, особенно аномалий ТПО в низких широтах, где аккумулируется большая часть притока тепла от Солнца.

Влияние ТПО в низких широтах на переносы в Арктику осуществляется посредством общей циркуляции атмосферы и циркуляции океана в Северной Атлантике. Начальным воздействием является формирование роста ТПО, вызывающее усиление меридиональных переносов в атмосфере, а в Атлантическом океане — увеличение океанического переноса тепла. В результате через 2,25 года отмечается рост температуры воды в Баренцевом море и увеличение зимних атмосферных переносов тепла через «атлантические ворота» на 70° с.ш., зимней температуры воздуха и сокращение площади морского льда в приатлантической Арктике.

Наибольший приток солнечной радиации приходится на низкие широты, где он формирует климатические области наибольшей температуры воздуха, максимальной ТПО и максимального содержания водяного пара в атмосфере. Инсоляция на верхней границе атмосферы здесь растёт. Эти изменения инсоляции в результате орбитальной динамики Земли невелики, но их влияние усиливается за счет накопления тепла в океане, который составляет большую часть области низких широт, малого альбеда поверхности океана и нелинейных обратных связей между температурой, содержанием водяного пара и нисходящим длинноволновым излучением.

Тренды инсоляции в низких широтах максимальны весной, т.е. в окрестности точки весеннего равноденствия на орбите Земли. Это указывает на влияние прецессии — медленного смещения точки равноденствия, когда приток солнечной радиации в низкие широты максимален, к перигелию, где он будет на 3 Вт/м^2 больше.

Найдена высокая корреляция в низких широтах между инсоляцией весной и приповерхностной температурой воздуха, температурой поверхности воды, содержанием водяного пара, нисходящей длинноволновой радиацией осенью. Такую связь можно объяснить кумулятивным эффектом притока инсоляции на поверхность океана, формирующим осенний максимум ТПО. Изменения характеристик атмосферы и океана в низких широтах, связанные с изменениями инсоляции, через 3 года проявляются в изменениях характеристик климата и морских льдов в Арктике.

Незначительный рост инсоляции приводит к значимым изменениям климатических параметров с участием нелинейной зависимости уходящей ДВ радиации и концентрации водяного пара от температуры. Учёт нелинейных зависимостей

показал вклад роста инсоляции в тренд ТПО равным 57 %. Оценка через чувствительность ТПО к росту общего содержания водяного пара и нисходящей ДВ-радиации составляет 55 % вклада роста общего содержания водяного пара в тренд ТПО и 28 % вклада роста концентрации CO_2 .

В радиационном блоке глобальных моделей CMIP6 солнечное воздействие представлено полной солнечной радиацией (*TSI*), солнечной спектральной освещенностью (*SSI*) и индексом F10.7, а также воздействием частиц, включая геомагнитные индексы *Ap* и *Kp*, скоростью ионизации для учета эффектов, солнечных протонов, электронов и галактических космических лучей. Об учёте долговременных изменений в распределении солнечного воздействия на верхней границе атмосферы, связанных с орбитальной динамикой Земли не упоминается ввиду априори принятого положения об их малости даже в сравнении с влиянием космических лучей.

Сравнение инсоляции на верхней границе атмосферы низких широт в 7 глобальных моделях и в расчётах из (<http://www.solar-climate.com>) показало, что сезонные изменения инсоляции с максимумом в мае и минимумом в декабре в разных моделях и в расчётах близки между собой, а тренды за 1979—2018 гг. среднемесячных значений инсоляции на верхней границе атмосферы показывают большой разброс между моделями и отличия от расчётов. При этом в моделях отсутствует тренд инсоляции верхней границе атмосферы низких широт весной, в отличие от трендов в расчётах с максимумом в апреле. Ни в одной из рассмотренных моделей не получено близкого к данным HadISST распределения трендов ТПО в выбранном районе тропической Северной Атлантики с максимумом в октябре, а все модельные тренды близки к равномерному распределению трендов содержания CO_2 в атмосфере низких широт.

Выполненные исследования указывают на потенциал улучшения воспроизведения глобальными моделями климата потепления в Арктике и в низких широтах при учёте медленных изменений радиационного воздействия на верхней границе атмосферы вследствие орбитальной динамики Земли.

Список литературы

1. Володин Е. М., Галин В. Я., Грицун А. С. и др. Математическое моделирование Земной системы. Под ред. Яковлева Н. Г. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
2. Voosen P. New climate models predict a warming surge // *Science*. 2019. Vol. 364. Issue 6437. P. 222—223. DOI: 10.1126/science.364.6437.222.
3. Voosen P. U. N. climate panel confronts implausibly hot forecasts of future warming // *Science*. 2021. Vol. 373. Issue 6554. P. 474—475. <https://doi.org/10.1126/science.373.6554.474>
4. World Climate Research Programme. WCRP High-level Science Questions and Flagship Workshop, 24 — 26 February 2020. Hamburg, Germany. April 2020. WCRP Publication No.: 2/2020.
5. Voosen P. Studies tying weather extremes to global warming gain rigor // *Science*. 2022. Vol 376. Issue 6599. P. 1256—1257 <https://doi.org/10.1126/science.add4866>.
6. Blackport R., Fyfe J. C. Climate models fail to capture strengthening wintertime North Atlantic jet and impacts on Europe // *Science Advances*. 2022. Vol. 8. Issue 45. DOI: 10.1126/sciadv.abn3112.
7. Kravtsov S. Pronounced differences between observed and CMIP5-simulated multidecadal climate variability in the twentieth century // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 5749—5757. doi:10.1002/2017GL074016.

8. Palmer M. D., Good S. A., Haines K. et al. A new perspective on warming of the global oceans // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. P. 1—5. doi:10.1029/2009GL039491.
9. IPCC Working Group I I; Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Proceedings of the IPCC; Stocker, T., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013; Volume AR5, p. 1535.*
10. Laepple T., Huybers P. Global and regional variability in marine surface temperatures // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41. doi:10.1002/2014GL059345.
11. Bilbao R. A. F., Gregory J.M., Bouttes N. et al. Attribution of ocean temperature change to anthropogenic and natural forcings using the temporal, vertical and geographical structure // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53. P. 5389—5413. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04910-1>.
12. Barsugli J. J., Shin S.-I., Sardeshmukh P. D. Sensitivity of global warming to the pattern of tropical ocean warming // *Climate Dynamics*. 2006. Vol. 27. P. 483—492.
13. Shin S.-I., Sardeshmukh P.D. Critical influence of the pattern of tropical ocean warming on remote climate trends // *Climate Dynamics*. 2011. Vol. 36. P. 1577—1591. doi:10.1007/s003.
14. Ding Q., Wallace J. M., Battisti D.S. et al. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in north-eastern Canada and Greenland // *Nature*. 2014. Vol. 509. P. 209—212. doi:10.1038/nature13260.
15. Long M., Zhang L., Hu S., Qian S. Multi-Aspect Assessment of CMIP6 Models for Arctic Sea Ice Simulation // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. Issue 4. P. 1515—1529.
16. Cai Z., You Q., Wu F., et al. Arctic warming revealed by multiple CMIP6 models: evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. Issue 12. P. 4871—4892. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0791.1>.
17. Shu Q., Wang Q., Su J., et al. Assessment of the Atlantic water layer in the Arctic Ocean in CMIP5 climate models // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53. P. 5279—5291.
18. Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., Wills R. C. J. Constraining the date of a seasonally ice-free Arctic using a simple model // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. e2021GL094309. doi.org/10.1029/2021GL094309.
19. Bonan D., Lehner F., Holland M. M. Partitioning uncertainty in projections of Arctic sea ice // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16. Issue 4. id.044002. 11 pp.
20. Cohen J., Screen J. A., Furtado J. C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 7. P. 627—637.
21. Blackport R., Screen J.A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves // *Science Advances*. 2020. Vol. 6. eaay2880.
22. Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28. P. 2154—2167. doi:10.1175/JCLI-D-14-00095.1.
23. Meleshko V. P., Johannessen O. M., Baidin A. V., et al. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream // *Tellus A*. 2016. Vol. 68. 32330.
24. Байдин А. В., Мелешко В. П. Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и повышение температуры поверхности океанов // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 6. С. 5—18.
25. Семенов В. А., Мохов И. И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 4. С. 403—421.
26. Årthun M., Eldevik T. On Anomalous Ocean Heat Transport toward the Arctic and Associated Climate Predictability // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. No. 2. P. 689—704.
27. Blackport R., Screen J. A., van der Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes // *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 697-704.
28. Cohen J., Zhang X., Francis J., et al. Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 20—29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.
29. Screen J. A., Francis J. A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6(9). P. 856.

30. Tokinaga H., Xie S. P., Mukougawa H. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114(24). P. 6227—6232.
31. Oort A. H. Year-to-year variations in the energy balance of the arctic atmosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1974. Vol. 79. P. 1253—1260. doi:10.1029/JC079i009p01253.
32. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В. Радиационный баланс Земли, ключевые аспекты. М.: Наука, 1988. 216 с.
33. Nakamura N., Oort A. H. Atmospheric heat budgets of the polar regions // *Journal of Geophysical Research*. 1988. Vol. 93. P. 9510—9524. doi:10.1029/JD093iD08p09510.
34. Serreze M. C., Barrett A. P., Slater A. G., et al. The large-scale energy budget of the Arctic // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007. Vol. 112. D11122. doi:10.1029/2006JD008230.
35. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., et al. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // *International Journal of Climatology*. 2019. Vol. 39. P. 1—11. doi:10.1002/joc.6040.
36. Cao Y., Liang S., Chen X., et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. 8462. doi:10.1038/s41598-017-08545-2.
37. Lee S., Gong T., Feldstein S.B., et al. Revisiting the cause of the 1989—2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 10.654—10.661, doi:10.1002/2017GL075375.
38. Визе В. Ю. Причины потепления Арктики // *Советская Арктика*. 1937. Т. 1. С. 1—7.
39. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
40. Gong T., Feldstein S., Lee S. The role of downward infrared radiation in the recent arctic winter warming trend // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30. P. 4937—4949. doi:10.1175/JCLI-D-16-0180.1.
41. Yoo C., Lee S., Feldstein S. B. Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012. Vol. 69. P. 2379—2393. doi:10.1175/JAS-D-11-0261.1.
42. Compo G. P., Sardeshmukh P. D. Oceanic influences on recent continental warming // *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 32. P. 333—342. doi:10.1007/s00382-008-0448-9.
43. Hao X., He S., Han T., Wang H. Impact of global oceanic warming on winter Eurasian climate // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2018. Vol. 35. P. 1254—1264. doi:10.1007/s00376-018-7216-5.
44. Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B., Ansell T. J. Isolating the signal of ocean global warming // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. P. 1—6. doi:10.1029/2007GL031712.
45. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pachauri, R. K., Meyer, L. A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
46. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
47. Hoerling M. P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change // *Science*. 2001. Vol. 292. P. 90—92.
48. Adam O., Schneider T., Harnik N. Role of changes in mean temperatures versus temperature gradients in the recent widening of the Hadley circulation // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 7450—7461. doi:10.1175/JCLI-D-14-00140.1.
49. Garfinkel C. I., Waugh D. W., Polvani L. M. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 10824—10831. doi:10.1002/2015GL066942.
50. Lee S., Gong T., Johnson N., et al. On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001 // *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24. P. 4350—4367. doi:10.1175/2011JCLI4003.1.
51. Park H. S., Lee S., Son S. W., et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28. P. 5030—5040. doi:10.1175/JCLI-D-15-0074.1.

52. Ye K., Wu R., Liu Y. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. Vol. 120. P. 2738—2753. doi:10.1002/2015JD023148.
53. Wettstein J. J., Deser C. Internal variability in projections of twenty-first-century Arctic sea ice loss: Role of the large-scale atmospheric circulation // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 527—550. doi:10.1175/JCLI-D-12-00839.1.
54. Goss M., Feldstein S. B., Lee S. Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. P. 1369—1389. doi:10.1175/JCLI-D-15-0267.1.
55. Hall R. J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979—2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability // *Climate Dynamics*. 2021. Vol. 56. P. 457—473. doi:10.1007/s00382-020-05485-y.
56. Yoo C., Feldstein S., Lee S. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979—2008 boreal winter // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. P. 1—6. doi:10.1029/2011GL049881.
57. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottensmeyer G., Visbeck M. *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2003. Vol. 134.
58. Алексеев Г. В., Вязилова А. Е., Глок Н. И., и др. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3 (35). С. 73—83.
59. Sandø A. B., Gao Y., Langehaug H. R. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations // *Journal of Geophysical Research: Ocean*. 2014. Vol. 119. P. 2095—2108. doi:10.1002/2013JC009435.
60. Alekseev G. V., Glok N. I., Smirnov A. V., Vyazilova A. E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 41. P. 544—558. doi:10.3103/S1068373916080045.
61. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss // *Journal of Climate*. 2019. Vol. 32. P. 3327—3341. doi:10.1175/JCLI-D-18-0750.1.
62. Pnyushkov A., Polyakov I., Rember R., et al. Heat, salt, and volume transports in the eastern Eurasian Basin of the Arctic Ocean, from two years of mooring observations // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14. P. 1—23. <https://doi.org/10.5194/os-14-1-2018>.
63. Алексеев Г. В., Пнюшков А. В., Смирнов А. В., и др. Влияние притока из Атлантики на содержание пресной воды в верхнем слое Арктического бассейна // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Том 65. № 4. С. 363—388.
64. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Том 1. С. 106—123;
65. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., et al. Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. Issue 1145. <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.
66. Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K. E. How fast are the oceans warming? Observational records of ocean heat content show that ocean warming is accelerating // *Science*. 2019. Vol. 363. P. 128—129. Doi: 10.1126/science.aav7619.
67. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Eddy J. A. Combined effect of Earth orbit perturbation and solar activity on terrestrial insolation. Part 1: Sample days and annual mean values // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1985. Vol. 42 (9). P. 933.
68. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Agaponov S.V. On Some Characteristics of Insolation Changes in the Past and in the Future // *Climate Change*. 1983. Vol. 5. P. 237—244.
69. Федоров В. М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2017. 231 с.
70. Федоров В. М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // *Доклады РАН*. 2015. Т. 460. № 3. С. 339—342.
71. Солнечная радиация и климат Земли: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.solar-climate.com> (дата обращения: 1.08.2022).
72. Алексеев Г. В., Священников П. Н. «Естественная изменчивость характеристик климата Северной полярной области и Северного полушария». Л.: Гидрометеиздат, 1991. 159 с.

73. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // IOP Conference Series. 2020. EES 606. EESE6061(002).
74. Alekseev G. Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming // Global Scientific Research in Environmental Science. 2021. Vol. 1(3). P. 1—3. 000514Qu.
75. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И., и др. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лёд и Снег. 2017. Том 57(3). С. 381—390.
76. Голицын Г. С., Мохов И. И. Оценки чувствительности и роли облаков в простых моделях климата // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 8. С. 803—814.
77. Мохов И. И. Температурная чувствительность площади криосферы Северного полушария // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 2. С. 136—143.
78. Chevallier F., Ciais P., Conway T. J., et al. CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 115, Issue D21. /10.1029/2010JD013887 doi.org.
79. Matthes K., Funke B., Andersson M. E., et al. Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // Geoscientific Model Development. 2017. Vol. 10. P. 2247—2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>.

References

1. Volodin E. M., Galin V. YA., Gricun A. S., et al. *Matematicheskoe modelirovanie Zemnoj sistemy = Mathematical modeling of the Earth system*. Ed. Yakovlev N.G. Moscow: MAKS Press, 2016: 328 p. (In Russ.).
2. Voosen P. New climate models predict a warming surge. *Science*. 2019; (364;6437):222—223. DOI: 10.1126/science.364.6437.222.
3. Voosen P. U. N. climate panel confronts implausibly hot forecasts of future warming. *Science*. 2021; (373;6554):474—475. <https://doi.org/10.1126/science.373.6554.474>
4. *World Climate Research Programme*. WCRP High-level Science Questions and Flagship Workshop, 24 — 26 February 2020. Hamburg, Germany. April 2020. WCRP Publication No.: 2/2020.
5. Voosen P. Studies tying weather extremes to global warming gain rigor. *Science*. 2022; (376;6599):1256—1257 <https://doi.org/10.1126/science.add4866>.
6. Blackport R., Fyfe J. C. Climate models fail to capture strengthening wintertime North Atlantic jet and impacts on Europe. *Science Advances*. 2022;(8;45) DOI: 10.1126/sciadv.abn3112.
7. Kravtsov S. Pronounced differences between observed and CMIP5-simulated multidecadal climate variability in the twentieth century. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):5749—5757. doi:10.1002/2017GL074016.
8. Palmer M. D., Good S. A., Haines K. et al. A new perspective on warming of the global oceans. *Geophysical Research Letters*. 2009;(36):1—5. doi:10.1029/2009GL039491.
9. IPCC Working Group 1 I; Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. et al. *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Proceedings of the IPCC; Stocker, T., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013; Volume AR5, p. 1535.
10. Laepple T., Huybers P. Global and regional variability in marine surface temperatures. *Geophysical Research Letters*. 2014;(41) doi:10.1002/2014GL059345.
11. Bilbao R. A. F., Gregory J.M., Bouttes N. et al. Attribution of ocean temperature change to anthropogenic and natural forcings using the temporal, vertical and geographical structure. *Climate Dynamics*. 2019;(53):5389—5413. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04910-1>.
12. Barsugli J. J., Shin S.-I., Sardeshmukh P. D. Sensitivity of global warming to the pattern of tropical ocean warming. *Climate Dynamics*. 2006;(27):483—492.
13. Shin S.-I., Sardeshmukh P. D. Critical influence of the pattern of tropical ocean warming on remote climate trends. *Climate Dynamics*. 2011;(36):1577—1591. doi:10.1007/s003.
14. Ding Q., Wallace J.M., Battisti D.S. et al. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in north-eastern Canada and Greenland. *Nature*. 2014;(509):209—212. doi:10.1038/nature13260.
15. Long M., Zhang L., Hu S., Qian S. Multi-Aspect Assessment of CMIP6 Models for Arctic Sea Ice Simulation. *Journal of Climate*. 2021;(34;4):1515—1529.

16. Cai Z., You Q., Wu F., et al. Arctic warming revealed by multiple CMIP6 models: evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties. *Journal of Climate*. 2021;(34;12):4871—4892. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0791.1>.
17. Shu Q., Wang Q., Su J., et al. Assessment of the Atlantic water layer in the Arctic Ocean in CMIP5 climate models. *Climate Dynamics*. 2019;(53):5279—5291.
18. Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., Wills R. C. J. Constraining the date of a seasonally ice-free Arctic using a simple model. *Geophysical Research Letters*. 2021;(48): e2021GL094309. doi.org/10.1029/2021GL094309.
19. Bonan D., Lehner F., Holland M. M. Partitioning uncertainty in projections of Arctic sea ice. *Environmental Research Letters*. 2021;(16;4):11 pp.
20. Cohen J., Screen J. A., Furtado J. C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*. 2014;(7):627—637.
21. Blackport R., Screen J. A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves. *Science Advances*. 2020;(6): eaay2880.
22. Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes. *Journal of Climate*. 2015;(28):2154—2167. doi:10.1175/JCLI-D-14-00095.1.
23. Meleshko V. P., Johannessen O. M., Baidin A. V., et al. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream. *Tellus A*. 2016;(68):32330.
24. Baidin A. V., Meleshko V. P. Response of the atmosphere at high and middle latitudes to the reduction of sea ice area and the rise of sea surface temperature. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2014;(6): (5—18). (In Russ.).
25. Semenov V. A., Mokhov I. I., Latif M. Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012;(48, 4): (403—421). (In Russ.).
26. Årthun M., Eldevik T. On Anomalous Ocean Heat Transport toward the Arctic and Associated Climate Predictability. *Journal of Climate*. 2016;(29;2):689—704.
27. Blackport R., Screen J. A., van der Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nature Climate Change*. 2019;(9): 697—704.
28. Cohen J., Zhang X., Francis J., et al. Divergent consensus on Arctic amplification influence on mid-latitude severe winter weather. *Nature Climate Change*. 2020;(10): 20—29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.
29. Screen J. A., Francis J. A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability. *Nature Climate Change*. 2016;(6(9)): 856.
30. Tokinaga H., Xie S. P., Mukougawa H. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017;(114(24)): 6227—6232.
31. Oort A. H. Year-to-year variations in the energy balance of the arctic atmosphere. *Journal of Geophysical Research*. 1974;(79):1253—1260. doi:10.1029/JC079i009p01253.
32. Marchuk G. I., Kondrat'ev K. YA., Kozoderov V. V. *Radiacionnyj balans Zemli, klyucheveye aspekty = Earth radiation budget: key aspects*. Moscow: Nauka, 1988: 216 p. (In Russ.).
33. Nakamura N., Oort A. H. Atmospheric heat budgets of the polar regions. *Journal of Geophysical Research*. 1988;(93): 9510—9524. doi:10.1029/JD093iD08p09510.
34. Serreze M. C., Barrett A. P., Slater A. G., et al. The large-scale energy budget of the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007;(112): D11122. doi:10.1029/2006JD008230.
35. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., et al. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *International Journal of Climatology*. 2019;(39): 1—11. doi:10.1002/joc.6040.
36. Cao Y., Liang S., Chen X., et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Scientific Reports*. 2017;(7):8462. doi:10.1038/s41598-017-08545-2.
37. Lee S., Gong T., Feldstein S. B., et al. Revisiting the cause of the 1989—2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):10.654—10.661, doi:10.1002/2017GL075375.
38. Vize V. Yu. The causes of Arctic warming. *Sovetskaya Arktika = Soviet Arctic*. 1937;(1): (1—7). (In Russ.).

39. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years. *Journal of Climate*. 2014;(27):2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
40. Gong T., Feldstein S., Lee S. The role of downward infrared radiation in the recent arctic winter warming trend. *Journal of Climate*. 2017;(30):4937—4949. doi:10.1175/JCLI-D-16-0180.1.
41. Yoo C., Lee S., Feldstein S. B. Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012;(69):2379—2393. doi: 10.1175/JAS-D-11-0261.1.
42. Compo G. P., Sardeshmukh P. D. Oceanic influences on recent continental warming. *Climate Dynamics*. 2009;(32): 333—342. doi:10.1007/s00382-008-0448-9.
43. Hao X., He S., Han T., Wang H. Impact of global oceanic warming on winter Eurasian climate. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2018;(35): 1254—1264. doi:10.1007/s00376-018-7216-5.
44. Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B., Ansell T. J. Isolating the signal of ocean global warming. *Geophysical Research Letters*. 2007;(34):1—6. doi:10.1029/2007GL031712.
45. *Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Pachauri, R. K., Meyer, L. A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
46. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years. *Journal of Climate*. 2014;(27): 2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
47. Hoerling M. P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*. 2001;(292): 90—92.
48. Adam O., Schneider T., Harnik N. Role of changes in mean temperatures versus temperature gradients in the recent widening of the Hadley circulation. *Journal of Climate*. 2014;(27): 7450—7461. doi:10.1175/JCLI-D-14-00140.1.
49. Garfinkel C. I., Waugh D. W., Polvani L. M. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends. *Geophysical Research Letters*. 2015;(42):10824—10831. doi:10.1002/2015GL066942.
50. Lee S., Gong T., Johnson N., et al. On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001. *Journal of Climate*. 2011;(24): 4350—4367. doi:10.1175/2011JCLI4003.1.
51. Park H. S., Lee S., Son S. W., et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability. *Journal of Climate*. 2015;(28): 5030—5040. doi:10.1175/JCLI-D-15-0074.1.
52. Ye K., Wu R., Liu Y. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015; (120): 2738—2753. doi:10.1002/2015JD023148.
53. Wettstein J. J., Deser C. Internal variability in projections of twenty-first-century Arctic sea ice loss: Role of the large-scale atmospheric circulation. *Journal of Climate*. 2014;(27): 527—550. doi:10.1175/JCLI-D-12-00839.1.
54. Goss M., Feldstein S. B., Lee S. Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming. *Journal of Climate*. 2016;(29): 1369—1389. doi:10.1175/JCLI-D-15-0267.1.
55. Hall R. J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979—2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability. *Climate Dynamics*. 2021; (56): 457—473. doi:10.1007/s00382-020-05485-y.
56. Yoo C., Feldstein S., Lee S. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979—2008 boreal winter. *Geophysical Research Letters*. 2011;(38): 1—6. doi:10.1029/2011GL049881.
57. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottensen G., Visbeck M. *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2003. Vol. 134.
58. Alekseev G. V., Vyazilova A. E., Glok N.I., et al. The effect of water temperature anomalies at low latitudes of the ocean on Arctic climate variations and their predictability. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2019;(3(35)): (73—83). (In Russ.).
59. Sandø A. B., Gao Y., Langehaug H. R. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. *Journal of Geophysical Research: Ocean*. 2014; (119): 2095—2108. doi:10.1002/2013JC009435.

60. Alekseev G. V., Glok N. I., Smirnov A. V., Vyazilova A. E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016;(41): 544—558, doi:10.3103/S1068373916080045.
61. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss. *Journal of Climate*. 2019;(32): 3327—3341, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0750.1.
62. Pnyushkov A., Polyakov I., Rember R., et al. Heat, salt, and volume transports in the eastern Eurasian Basin of the Arctic Ocean, from two years of mooring observations. *Ocean Science*. 2018; (14): 1—23, <https://doi.org/10.5194/os-14-1-2018>.
63. Alekseev G. V., Pnyushkov A. V., Smirnov A. V., et al. Influence of Atlantic inflow on the freshwater content in the upper layer of the Arctic basin. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2019; (65,4): (363—388). (In Russ.).
64. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glok N. I. Influence of water temperature anomalies in the low latitudes of the ocean on the atmospheric transport of heat to the Arctic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2017: (1): (106—123). (In Russ.).
65. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., et al. Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;(9;1145) <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.
66. Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K. E. How fast are the oceans warming? Observational records of ocean heat content show that ocean warming is accelerating. *Science*. 2019;(363): 128—129. Doi: 10.1126/science.aav7619.
67. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Eddy J. A. Combined effect of Earth orbit perturbation and solar activity on terrestrial insolation. Part 1: Sample days and annual mean values. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1985; (42 (9)): 933.
68. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Agaponov S. V. On Some Characteristics of Insolation Changes in the Past and in the Future. *Climate Change*. 1983;(5):237—244.
69. Fedorov V. M. *Insolyaciya Zemli i sovremennye izmeneniya klimata = Earth insolation and modern climatic changes*. Moscow: Fizmatlit, 2017: 231 p. (In Russ.).
70. Fedorov V. M. Latitudinal variability of incoming solar radiation in various time cycles. *Doklady RAN = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(460,3): (339—342). (In Russ.).
71. Solar radiation and the Earth's climate. Available at: <http://www.solar-climate.com>
72. Alekseev G. V., Svyaschennikov P. N. *Natural Variability of Climate Characteristics of the Northern Polar Region and the Northern Hemisphere*. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 159 p.
73. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // *IOP Conference Series*. 2020. EES 606. EESE6061(002).
74. Alekseev G. Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming // *Global Scientific Research in Environmental Science*. 2021. Vol. 1(3). P. 1—3. 000514Qu.
75. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glok N. I., et al., Influence of the Atlantic on warming and reduction of sea ice cover in the Arctic, *Led i Sneg*. 2017. Volume 57(3). pp. 381—390.
76. Golitsyn G. S., Mokhov I. I. Estimates of the sensitivity and role of clouds in simple climate models // *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Physics of the atmosphere and ocean*. 1978. V. 14. No. 8. S. 803—814.
77. Mokhov I. I. Temperature sensitivity of the area of the cryosphere of the Northern Hemisphere // *Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean*. 1984. V. 20. No. 2. S. 136—143.
78. Chevallier F., Ciais P., Conway T. J., et al. CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Vol. 115, Issue D21. /10.1029/2010JD013887 doi.org.
79. Matthes K., Funke B., Andersson M. E., et al. Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // *Geoscientific Model Development*. 2017. Vol. 10. P. 2247—2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>.

Информация об авторе

Алексеев Генрих Васильевич, доктор геогр. наук, профессор, Отдел взаимодействия океана и атмосферы, зав. отделом, пл. научн. сотрудник, ФГБУ «ААНИИ», alexhgv@aari.ru.

Information about author

Alekseev Genrikh Vasilievich, Doctor Sci., professor, Department of Ocean-Atmosphere Interaction, Head of department, FGBU "AARI".

Статья поступила 18.03.2023

Принята в печать 03.05.2023

The article was received on 18.03.2023

The article was accepted 03.05.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 231—248.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):231—248.

МЕТЕОРОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья
УДК 551.509.616+551.576
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-231-248

Искусственные атмосферные облачные образования: обзор исследований

***Александр Павлович Доронин, Вячеслав Михайлович Петроченко,
Наталья Александровна Козлова, Георгий Георгиевич Щукин,
Виктор Викторович Филиппёнок***

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия,
vmpetrochenko@mail.ru

Аннотация. В статье на основе предложенной классификации атмосферных облачных образований приведены результаты системного анализа методов и технических средств целенаправленного (целевого) создания искусственных атмосферных облачных образований (искусственных облаков и туманов — ИОТ), а также показаны уровни разработки рассмотренных методов. Приведен анализ публикаций по теме создания ИОТ и определены задачи, решаемые с их помощью.

Ключевые слова: атмосферные облачные образования, антропогенные искусственные атмосферные облачные образования, искусственные облака и туманы

Для цитирования: Доронин А. П., Петроченко В. М., Козлова Н. А., Щукин Г. Г., Филиппёнок В. В. Искусственные атмосферные облачные образования: обзор исследований // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 231—248. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-231-248.

METEOROLOGY. REVIEW

Original article

Artificial atmospheric cloud formations: state and prospects of research

***Alexander P. Doronin, Vyacheslav M. Petrochenko, Natalya A. Kozlova,
Georgiy G. Shchukin, Victor V. Filippenok***

Military Space academy named after A. F. Mozhaisky

Summary. The article presents a classification of atmospheric cloud formations, which includes, along with clouds and fogs of natural origin, also anthropogenic atmospheric cloud formations of an unintentional nature, accompanying human economic activity, and intentional nature (artificial clouds and fogs purposefully created by man).

© Доронин А. П., Петроченко В. М., Козлова Н. А., Щукин Г. Г., Филиппёнок В. В., 2023

Based on a systematic analysis of patent materials and information sources in this subject area, possible methods for creating artificial clouds and fogs are summarized, indicating the level of their implementation.

It is shown that at present it is possible to create the following types of artificial clouds and fogs: artificial cirrus crystalline clouds, artificial convective clouds, artificial wavy clouds, artificial fogs, artificial low-altitude water-aerosol formations. Some results of field experiments on the creation of artificial fogs and clouds of various forms in our country and abroad are presented.

The list of solved applied tasks in the creation of artificial clouds and fogs is defined. The possibility of solving such problems is shown by the example of destroying thunderstorms, hail in large areas with the help of artificial cirrus clouds and by the example of destroying frost with the help of artificial fogs created by thermo kinetic installations.

Keywords: atmospheric cloud formations, anthropogenic artificial atmospheric cloud formations, artificial clouds and fogs

For citation: Doronin A. P., Petrochenko V. M., Kozlova N. A., Shchukin G. G., Filippenok V. V. Artificial atmospheric cloud formations: state and prospects of research. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):231—248. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-231-248.

Введение

Одной из отличительных негативных особенностей XXI века является увеличение числа опасных природных явлений, которые могут способствовать образованию стихийных бедствий и возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного характера (наводнения, засухи, лесные пожары, заморозки и др.). В отдельных случаях ущерб от ряда ЧС природного характера может составлять десятки и даже сотни миллиардов рублей. Например, ущерб от катастрофических наводнений в Дальневосточном регионе в 2013 году составил 527 млрд. руб., а размер ущерба, нанесенного в Иркутской области в 2019 году, оценен в 25 млрд. руб. [1]. Проблема, связанная с разработкой системы мер, методов и средств, позволяющих в значительной мере снизить, а лучше, конечно, полностью исключить, негативные последствия ЧС природного характера, является актуальной.

В нашей стране, наряду с традиционными мерами борьбы с опасными природными явлениями (строительство плотин, водохранилищ, каналов, противоселевых и противолавинных защитных сооружений, модернизация и расширение наземной гидрометеорологической сети, развитие авиационного и космического компонентов национальной системы мониторинга и прогнозирование опасных гидрометеорологических явлений и др.), значительное внимание уделяется вопросам искусственного изменения атмосферных процессов и явлений.

Обобщение и детальный анализ работ в данной предметной области показывает, что наиболее существенные результаты достигнуты к настоящему времени в области модифицирования облаков и туманов, наблюдающихся при значениях температуры воздуха ниже нуля градусов Цельсия. Доказательством этому утверждению могут служить мероприятия по вызыванию искусственных осадков для тушения лесных пожаров, а также регулярно проводимые мероприятия по воздействию на слоистообразные, волнистообразные и конвективные облака над мегаполисами с целью обеспечения хорошей погоды в дни государственных праздников [2, 3, 4].

Наряду с проведением и расширением такого рода работ в нашей стране в последние годы стало все больше уделяться внимания также и разработке методов и средств, позволяющих целенаправленно создавать искусственные атмосферные облачные образования для очищения атмосферы от пыли в зонах песчаных и угольных наземных карьеров, локализации выбросов в районах аварий на предприятиях газо- и нефтеперерабатывающих предприятий, АЭС и др.

Исходя из этого, целью работы является оценивание уровня разработки методов и средств целенаправленного создания искусственных туманов и облаков различных видов и определение перспектив их практической реализации.

Классификация атмосферных облачных образований

Научно-технический прогресс и бурное развитие промышленной базы государства привели к тому, что в природе, наряду с естественными облаками и туманами, стало возможным также и создание атмосферных облачных образований антропогенного происхождения как непреднамеренного, так и преднамеренного (целенаправленного, целевого) характера.

С учетом детализации существующей в настоящее время классификации облаков и туманов [5, 6] в настоящей работе предлагается классификация атмосферных облачных образований (АОО), представленная на рис. 1.

Отличительной особенностью предлагаемой классификации атмосферных облачных образований является то, что она дополняется классификацией искусственных антропогенных атмосферных образований непреднамеренного характера, связанных с хозяйственной деятельностью человека, и преднамеренного (целенаправленного) характера (искусственные облака и туманы).

Вследствие этого представляется важным рассмотреть физические основы и методы целенаправленного (целевого) создания искусственных атмосферных облачных образований (искусственных облаков и туманов).



Рис. 1. Классификация атмосферных облачных образований.

Fig. 1. Classification of atmospheric cloud formations.

Физические основы, методы и технические средства создания искусственных облаков и туманов

Интерес к проблеме создания ИОТ обусловлен следующими обстоятельствами:

1. Искусственные облака и туманы являются по существу новым видом антропогенных атмосферных облачных образований (см. рис. 1).

2. Искусственные облака и туманы позволяют решать различные прикладные задачи, перечень которых приводится ниже.

3. Искусственные облака и туманы могут быть созданы в разные сезоны года, в различных физико-географических районах России в широком диапазоне высот (от земной поверхности до тропопаузы).

4. Искусственные облака и туманы, в частности искусственные перистые кристаллические облака, созданные на большой территории, позволяют осуществлять воздействия на процессы создания и эволюции крупных барических образований, например, тропических циклонов.

Методы создания искусственных облаков и туманов базируются на следующих положениях [7, 8]:

— способности некоторых химических веществ (в частности, гигроскопических) способствовать образованию капель тумана (облака);

— существовании в атмосфере слоев с пересыщением водяного пара над льдом;

— наличии в пограничном слое атмосферы неустойчивой стратификации температуры воздуха ($\gamma > \gamma_a$).

Результаты анализа информационных материалов по созданию искусственных облаков и туманов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Методы создания искусственных облаков и туманов

Methods of creating artificial clouds and fogs

Вид искусственных облаков (туманов)	Сущность метода	Источник	Уровень разработки метода		
			ТИ	ЛИ	НЭ
1. Искусственные перистые кристаллические облака	1.1. Использование продуктов сгорания топлива, выбрасываемых в атмосферу двигателями летательных аппаратов	[6]	+	+	+
	1.2. Внесение дополнительной влаги в атмосферу путем диспергирования с помощью специальных устройств, установленных на самолете	[8, 9]	+	+	–
	1.3. Диспергирование хладореагентов, с помощью специальных устройств, размещенных на самолетах	[10]	+	+	+
	1.4. Диспергирование частиц йодистого серебра (AgI) с помощью пиропатронов-генераторов или генераторов аэрозолей AgI	[10]	+	+	+

Продолжение табл. 1

Вид искусственных облаков (туманов)	Сущность метода	Источник	Уровень разработки метода		
			ТИ	ЛИ	НЭ
2. Искусственные конвективные облака	2.1. Использование устройств, создающих вертикальные струи теплого воздуха	[11, 12]	+	+	+
	2.2. Диспергирование гигроскопических веществ в атмосферу с помощью специальных устройств, размещенных на самолете (в тропосфере)	[13]	+	-	-
	2.3. Распыление мелкодисперсной сажи (в тропиках) с помощью специальных устройств, размещенных на самолете	[14]	+	+	-
	2.4. Изменении альбеда подстилающей поверхности	[15]			
	2.4.1. Создание асфальтовых покрытий	[15]	+	+	-
	2.4.2. Создание искусственных островов в крупных водоемах и морях	[15].	+	+	-
	2.4.3. Окрашивание подстилающей поверхности	[16]	+	-	-
	2.5. Использование плоских зеркал, отражающих солнечные лучи в одном направлении	[17]	+	-	-
	2.6. Создание влажных восходящих потоков воздуха в совокупности с применением охлаждающих систем для охлаждения поднятого воздуха	[18]	+	-	-
	2.7. Внесение в восходящий поток или межоблачные промежутки льдообразующих реагентов совместно с ионогенным гигроскопическим веществом с преимуществом преобладанием отрицательных ионов	[19]	+	-	-
	2.8. Создание восходящего потока воздуха в атмосфере	[12, 20]	+	-	-
	3. Искусственные волнистообразные облака	2.9. Комбинированный метод			
2.9.1. Применение метеотронов совместно с дымовыми шашками		[11]	+	+	+
2.9.2. Применение термокинетических систем для диспергирования водных растворов гигроскопических веществ и их смесей определенной концентрации		[21]	+	+	+
2.10. Использование специальных ракет, вызывающих торнадо небольшой мощности и запускаемых с земли, из верхних слоев атмосферы либо из-под воды, что предпочтительно		[22]	+	-	-
2.11. Использование авиационных или ракетных средств, оснащенных генераторами (ракетами) для диспергирования химических веществ, активирующих образование облаков		[23]	+	-	-
2.12. Использование потока отрицательных ионов, вводимых в восходящие потоки воздуха		[24]	+	-	-
3.1. Применение вертолетов		[25]	+	+	+
3.2. Применение пиротехнических составов на основе гигроскопических веществ, доставляемых в атмосферу с помощью самолета		[4, 26]	+	+	+
3.3. Применение хладореагентов, доставляемых в атмосферу с помощью самолета		[4, 6]	+	+	-

Вид искусственных облаков (туманов)	Сущность метода	Источник	Уровень разработки метода		
			ТИ	ЛИ	НЭ
4. Искусственные туманы	3.4. Применение кристаллизующих веществ, доставляемых в атмосферу с помощью самолета	[4, 6]	+	+	–
	3.5. Комбинированный метод по п. 2.9.2	[21]	+	+	+
	3.6. Освобождение акваторий от льда (с помощью ледоколов или взрывных средств)	[6]	+	+	+
	3.7. Использование выбросов из труб морских судов	[6]	+	+	+
	3.8. Диспергирование воды в подинверсионный слой атмосферы при низких отрицательных значениях температуры воздуха (ниже минус 20—25 °С)	[6]	+	+	+
	3.9. Применение гигроскопических веществ, диспергируемых в атмосферу с помощью специальных наземных установок	[13, 21]	+	+	+
	4.1. Применение гигроскопических веществ, диспергируемых в атмосферу с помощью специальных наземных установок	[13, 21]	+	+	+
	4.2. Применение пиротехнических составов на основе гигроскопических веществ	[27]	+	+	+
	4.3. Применение хладореагентов	[4]	+	+	+
	4.4. Применение кристаллизующих веществ	[4]	+	+	+
5. Искусственные низковысотные водно-аэрозольные образования	4.5 Комбинированный метод по п. 2.9.2	[21]	+	+	+
	4.6. Метод по п. 3.6	[6, 7]	+	+	+
	4.7. Метод по п. 3.8	[6]	+	+	+
	5.1. Диспергирование воды в атмосферу	[28]	+	+	+
	5.2. Комбинированный метод				
	5.2.1. Метод по п. 5.1 совместно с ПАВ	[28]	+	+	+
	5.2.2. Метод по п. 2.9.2 совместно с ПАВ	[21]	+	+	+
6. Искусственные облака в верхней атмосфере земли	5.3. Комбинированные завесы				
	5.3.1. Метод по п. 2.9.2 совместно с дымами	[6, 21]	+	+	+
	5.3.2. Метод по п. 2.9.2 совместно с шашками и ТДА (тепловой дымовой аппарат)	[6, 21]	+	+	+
	6.1. Использование ракет или КА оснащенных генераторами для диспергирования частиц химического вещества (например, йодистого серебра) или фрактальных частиц различных металлов (нанометаллы), жидкого нагретого реагента	[29, 30]	+	–	–
	6.2. Использование ракет или КА, оснащенных емкостью с реагентами и управляемыми источниками сжатого газа, в качестве которого могут использоваться заряды пиротехнического взрывчатого вещества или аккумуляторы высокого давления	[31]	+	–	–
6.3. Распыление в околоземном пространстве аэрозольных частиц на высоте, где концентрация электрических частиц превышает значение 10^3 г/см ³	[32]	+	–	–	

Примечание: ТИ — теоретические исследования; ЭИ — экспериментальные исследования (в том числе и численный эксперимент); НЭ — натуральный эксперимент.

Приведенный в табл. 1 термин «искусственные низковысотные водно-аэрозольные образования» относится к атмосферным образованиям в приземном слое атмосферы, созданным при использовании специальных тепловых машин с установленным на них авиационным двигателем (в частности, ТМС-65Д и ТДАЗ), в сопло которого подается в большом количестве вода для создания насыщенной водяным паром локальной области. Образование тумана в этом случае происходит на небольшой площади (сотни-тысячи м²), при этом время его существования определяется временем работы двигателя. Именно малые значения пространственно-временных характеристик искусственных низковысотных водно-аэрозольных образований являются основным отличительным признаком, позволяющим выделить их в самостоятельный вид искусственных атмосферных облачных образований. Для увеличения времени существования таких атмосферных образований в сопло двигателя ТМС-65Д вводятся, наряду с водой, и ПАВ. Эта операция на 10—15 мин увеличивает продолжительность жизни таких атмосферных образований.

Анализ приведенных в табл. 1 данных позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, уровень разработки методов создания искусственных облаков и туманов изменяется от теоретических исследований до натуральных экспериментов. При этом можно отметить, что натурные эксперименты проведены в отношении перистых кристаллических облаков (1.1, 1.3, 1.4), искусственных жидко-капельных конвективных облаков (2.1, 2.9.1, 2.9.2), искусственных жидко-капельных (3.1, 3.2, 3.5, 3.6, 3.7) и кристаллических (3.3, 3.4, 3.8, 3.9) волнистообразных облаков, искусственных теплых (4.1, 4.2, 4.5, 4.6) и кристаллических (4.3, 4.4, 4.7) туманов и низковысотных водно-аэрозольных образований (5.1, 5.2, 5.3).

Во-вторых, хотя к настоящему времени ни один из приведенных в табл. 1 методов создания искусственных облаков и туманов не доведен до уровня оперативного применения, представляется возможным выделить те из них, которые уже в самое ближайшее время могут найти самое непосредственное применение на практике. К ним относятся методы создания на больших площадях искусственных кристаллических перистых и волнистообразных облаков, образуемых с помощью самолетов, а также искусственных конвективных облаков, создаваемых на основе наземных термокинетических систем, способных применять водные растворы гигроскопических веществ. Кроме того, в дополнение к вышеуказанным методам следует также указать методы создания искусственных жидкокапельных волнистообразных облаков, туманов и низковысотных водно-аэрозольных образований на гораздо меньших площадях.

В-третьих, для создания искусственных облаков различных видов необходимо использование самолетов, оборудованных устройствами для выброса в атмосферу химических веществ и водных рецептур, а также термокинетических установок различных типов, выпускаемых отечественной промышленностью (например, ТМС-65Д, ТДА-3, ТДА-2К и др.). Для создания конвективных облаков целесообразно использование термокинетических установок с вертикальным расположением сопла, либо с его максимально возможным подъемом по вертикали (например, ТМС-65Д с углом подъема до 15°). Для создания туманов и низковысотных водно-аэрозольных образований предпочтительно использование термокинетических установок.

Для убедительности выводов приводятся некоторые результаты натуральных экспериментов по созданию искусственных облаков и туманов.

Необходимо отметить, что за рубежом также проводятся широким фронтом аналогичные работы в области разработки методов создания искусственных облаков и туманов и технических средств их реализации [10, 14, 16, 17, 18, 22, 23, 26, 27].

Результаты натуральных экспериментов по созданию искусственных облаков и туманов

Разработка физических основ, методов и технических средств создания искусственных облаков и туманов позволила приступить к проведению натуральных экспериментов. Несмотря на большое разнообразие методов и технических средств создания искусственных облаков и туманов практическая реализация их оказалась довольно сложной. В ряде исследований приводятся результаты немногочисленных натуральных экспериментов в этом направлении. Описание условий подготовки, проведения и контроля результатов является далеко не полным.

За рубежом первые натуральные эксперименты по созданию искусственных кристаллических облаков в верхней тропосфере были проведены в начале 50-х годов прошлого века [33]. В одном из экспериментов засев безоблачной атмосферы осуществлялся путем диспергирования твердой углекислоты (CO_2) с помощью авиационных средств. Расход реагента составлял 450 г/км пути полета самолета протяженностью 16 км. В результате засева CO_2 наблюдалось образование искусственных облаков, состоящих из ледяных кристаллов неправильной формы. Ширина облачного слоя составляла порядка 3 км, а время его существования — более 3 часов. В последующих экспериментах расход углекислоты составлял 1 кг/км.

В нашей стране были проведены эксперименты по созданию конвективных облаков с помощью метеотронов, представляющих собой устройства на базе нескольких турбореактивных двигателей типа РД-3М и РД-3М-500 [11]. Натурные эксперименты по изучению возможности создания кучевых облаков проводились летом 1966 г. в Риге. Все эксперименты выполнялись при безоблачной погоде или при наличии некоторого количества облаков верхнего или среднего яруса в условиях внутримассовой погоды, обусловленной наличием антициклона или размытого барического поля. Подробно условия проведения и результаты опытов по созданию искусственных облаков приведены в [11]. Большая часть экспериментов выполнялась с 9 ч 30 мин до 10 ч мск. Согласно проведенным экспериментам, в 9 опытах из 15 над установкой образовывались облака, которые никогда не развивались до стадии более мощной, чем кучевые облака хорошей погоды. Максимальные горизонтальные размеры облаков не превышали 600 м, а их вертикальная протяженность была в пределах 300 м, при чем в пяти случаях облака образовывались в результате сжигания дымовых шашек и имели форму разорвано-кучевых облаков.

Описание ряда экспериментов по созданию некоторых видов искусственных атмосферных облачных образований с помощью ТМС-65Д приведено в работе [34]. Внешний вид данной установки показан на рис. 2.

Работы проводились в теплое полугодие в Поволжье при положительных значениях температуры воздуха, скорости ветра — не более 4—5 м/с, влажности



Рис. 2. Тепловая машина ТМС-65Д.

Fig. 2. TMS-65D heatengine.

воздуха — не более 90—95 % и не менее 50—55 %. Применялись водные растворы мочевины, поваренной соли, ПАВ и их смеси различных концентраций.

В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены результаты экспериментов по созданию искусственных туманов и волнистообразных облаков.



Рис. 3. Создание искусственных туманов с помощью ТМС-65Д.

Fig. 3. Creation of artificial fogs using TMS-65D.

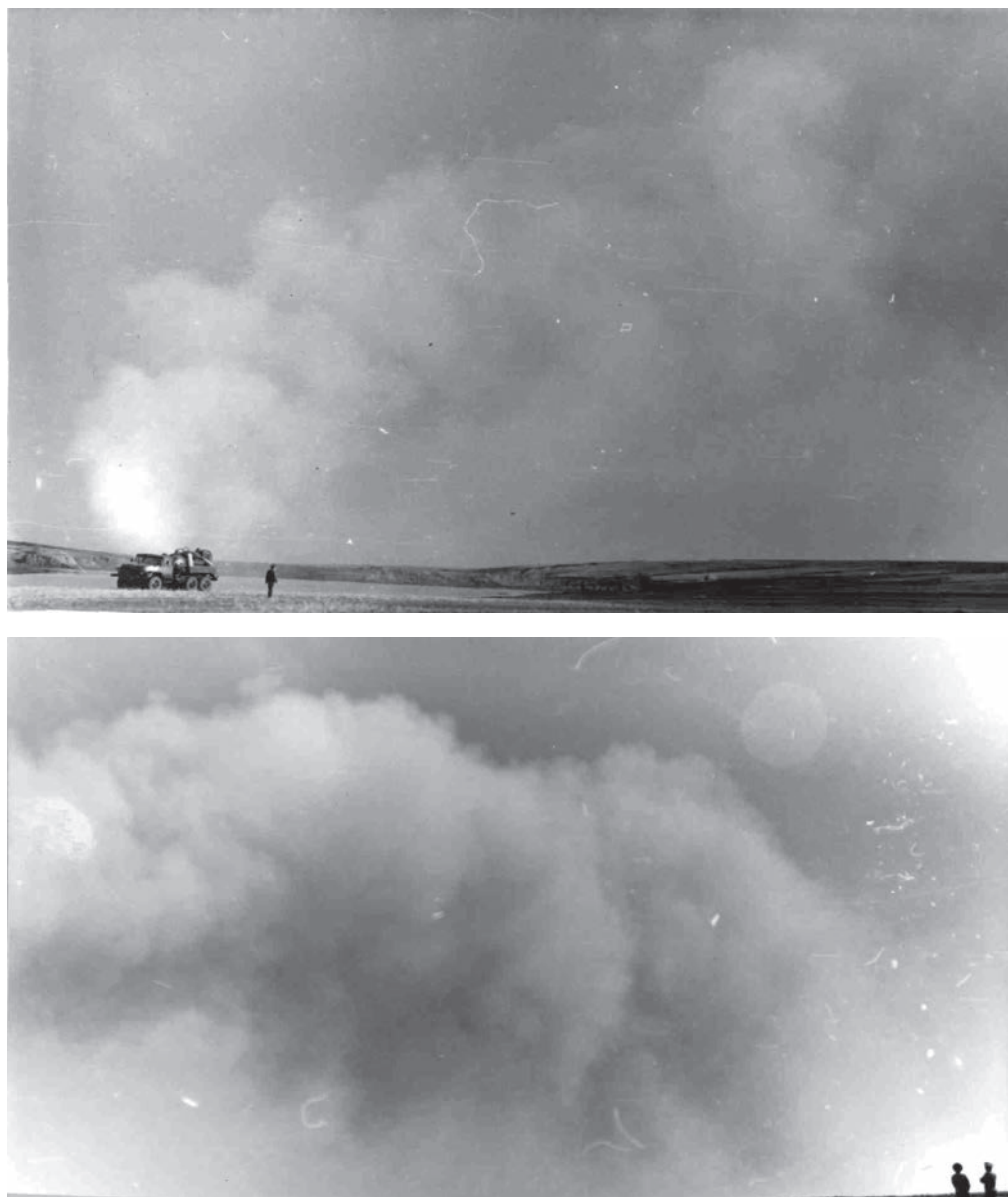


Рис. 4. Создание искусственных волнистообразных облаков с помощью ТМС-65Д.

Fig. 4. Creation of artificial wavy clouds using TMS-65D.

При использовании ТМС-65Д протяженность искусственного тумана составляла несколько км (до 4—5 км), ширина — 0,3—0,5 км, толщина — 100—300 м. Существенное влияние на образование искусственного тумана (наряду с ветром) оказывает влажность воздуха. Установлено, что при влажности менее 70 % время его жизни связано непосредственно с временем работы двигателя ТМС-65Д. При влажности воздуха более 80 % оно значительно больше, составляя десятки минут.

Кроме указанных выше искусственных атмосферных облачных образований, ТМС-65Д может быть также применена и для создания конвективных облаков. Возможность решения такой задачи была наглядно продемонстрирована в работе [34]. Это связано с тем, что особенностью данной установки является возможность регулирования подъема сопла двигателя в вертикальной плоскости (до 15°). В этом случае обеспечивается доставка химических веществ, находящихся в водном растворе, после введения его в сопло двигателя на значительную высоту в атмосфере, вплоть до уровня конденсации. В экспериментах исследовались водные растворы таких химических реагентов, как: хлористый кальций, карбамид, аммиачная селитра, а также водные растворы их смесей заданной концентрации. Фрагменты проведенного в натуральных условиях эксперимента по решению поставленной задачи показаны на рис. 5.

Как видно из приведенных данных на рис. 5, искусственное конвективное облако превратилось в мощно-кучевое. Это можно объяснить тем, что уровень конденсации располагался на незначительной высоте, до которого достигала струя с реагентом от сопла двигателя ТМС-65Д, при этом ветер был слабый, а влажность воздуха высокая (85—90 %). Инверсия в пограничном слое не наблюдалась.

В результате проведенных работ можно сделать вывод о том, что создание искусственных облаков и туманов может быть выполнено с помощью технических средств типа ТМС-65Д, способных осуществлять диспергирование водных растворов различных химических веществ.

Работы по созданию искусственных облаков и туманов неразрывно связаны с проведением исследований по оцениванию влияния применяемых химических веществ на состояние природной среды как в районах проведения экспериментов, так и за их пределами. Выполненные в этом направлении исследования [34, 35] позволили сделать вывод о том, что применяемые водные рецептуры для создания искусственных облаков и туманов не наносят практически никакого вреда природной среде.

Результаты натуральных экспериментов по созданию искусственных облаков и туманов позволяют определить перечень решаемых в этом случае прикладных задач. В первом приближении в него могут войти такие хозяйственные и экологические задачи, как: борьба с заморозками и интенсифицирование таяния снега на сельскохозяйственных полях с помощью искусственных туманов, предотвращение образования тропических циклонов и радиационных туманов путем создания искусственных перистых кристаллических облаков, очищение атмосферы мегаполисов и песчаных (угольных) карьеров от загрязняющих веществ и пыли и др.

В качестве примеров решения перечисленных выше задач в работе рассмотрены возможность создания мезомасштабных облачных полей для борьбы с грозами, градом, туманами [9] и способ борьбы с заморозками искусственными туманами с помощью термокинетических установок.



Рис. 5. Фрагмент эксперимента по созданию конвективных облаков.

Fig. 5. Fragment of an experiment on the creation of convective clouds.

Согласно расчетам, приведенным в [9], для создания перистых кристаллических облаков на площади $100 \times 100 \times 0,3$ км в течение трех часов потребуется один самолет типа Ту-104, оснащенный установкой для диспергирования капель воды радиусом от 2 до 10 мкм общей массой 10 т. Следует заметить, что при сгорании 30 т керосина в атмосферу дополнительно к 10 т воды в атмосферу будет выделено еще 42 т воды, т.е. в течение 3-х часового полета самолет-оператор ежесекундно вводит 4,815 кг водяного пара. Этого суммарного количества водяного пара достаточно для получения величины дополнительной абсолютной влажности, равной $0,0785 \text{ г/м}^3$, что существенно увеличивает образование облачных элементов с созданием сплошного поля перистых облаков.

Во втором случае расчеты показывают, что для защиты полей сельхозугодий от заморозков на площади 2×4 км для создания теплого тумана необходимо 4 машины ТМС-65Д и 4 машины АРС-14 в течение трех часов. Расход химического реагента (карбамида марки Б) для приготовления 20 % водного раствора данного вещества составит в этом случае порядка 5 тонн.

Сравнительный анализ стоимости предлагаемого водного раствора для создания искусственного тумана в качестве средства защиты сельхозкультур от заморозка с дымовой аэрозольной завесой, создаваемой на аналогичной площади с применением тех же технических средств (4 машины ТМС-65Д и 4 машины АРС-14) в течение трех часов при сжигании 25 тонн смеси на основе нефтепродуктов, показывает, что в первом случае стоимость такого мероприятия будет в 6 раз меньше, чем при использовании дымовой аэрозольной завесы.

Выводы

1. Искусственные облака и туманы являются по существу новым видом антропогенных атмосферных образований, которые могут быть целенаправленно созданы человеком для практического использования в различных регионах нашей страны.

2. На основе системного анализа патентных материалов и информационных источников в данной предметной области обобщены возможные методы создания искусственных облаков и туманов. Рассмотренные в работе методы и средства их создания в ряде случаев прошли экспериментальную проверку в натуральных условиях в различных районах России и в разные сезоны года и показали принципиальную возможность создания искусственных теплых туманов, искусственных теплых волнистообразных облаков и облаков вертикального развития.

3. Используемые для создания искусственных облаков и туманов химические кристаллообразующие реагенты и водные растворы гигроскопических веществ не наносят заметного вреда природе.

4. Определен перечень решаемых прикладных задач при создании искусственных облаков и туманов. Возможность решения таких задач показана на примере борьбы с грозами, градом на больших территориях с помощью искусственных перистых облаков и на примере борьбы с заморозками с помощью искусственных туманов, создаваемых термокинетическими установками.

Список литературы

1. Краснопеев С. М., Неров И. О., Бугаец А. Н. Потенциал ДЗЗ для восстановления высокодетальной ЦМР заглавливаемой зоны прирусловой поймы крупных рек // Геоинформатика. 2022. № 4. С. 28—35. doi:10.47148/1609-364X-2022-4.
2. Доронин А. П., Гончаров И. В., Петrochenko В. М., Козлова Н. А., Тимошук А. С. Исследование характеристик конвективных облаков над центральным районом европейской части России применительно к проблеме профилактики возникновения лесных пожаров и борьбы с ними // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 28—40.
3. Козлов В. Н., Доронин А. П., Петrochenko В. М. Экологическая опасность лесных пожаров и методы ее предотвращения // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48. С. 234—248.
4. Корнеев В. П., Колосков Б. П., Бычков А. А., Петрунин А. М., Частухин А. Б. Активные воздействия на облака с целью улучшения условий погоды в мегаполисах // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 61—70.
5. Андреев А. О., Дукальская М. В., Головина Е. Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание. / Под ред. д-ра геогр. наук А. И. Угрюмова. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2007, 228 с.
6. Мазуров Г. И., Акселевич В. И., Биденко С. И. Облачные мезонеоднородности и возможности управления их эволюцией в целях создания локальных благоприятных условий погоды. СПб.: «Технолит», 2013. 191 с.
7. Доронин А. П., Козлов С. И., Петrochenko В. М., Филиппёнок В. В. Искусственные атмосферные образования: методы и технические средства, области применения // Труды ВКА имени А. Ф. Можайского. 2022. Вып. 685. С. 108—115.
8. Козлов В. Н., Мазуров Г. И., Доронин А. П., Коршун Н. А. Физические основы искусственного образования облачности в верхней тропосфере // Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. 2014. Вып. 570. С. 261—273.
9. Зайцев В. А., Кудрявцев Б. П., Ледохович А. А. Возможности и пути создания полей искусственных облаков // Метеорология и гидрология. 1977. № 3. С. 3—9.
10. Detwiler A., Pratt R. Clear-air seeding: opportunities and strategies // Journal of Weather Modification. 1984. V. 16. № 1. P. 46—60.
11. Вульфсон Н. И., Левин Л. М. Метеотрон как средство воздействия на атмосферу. М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1987. 130 с.
12. Патент № 2732710 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (2006.01). СПК A01G 15/00 (2020.02). Способ создания искусственных облаков и осадков: № 2019110769: заявл. 11.04.2019: опубл. 22.09.2020, бюл. № 27 / Абшаев М. Т.: патентообладатели: Абшаев М. Т. (Россия); Общество с ограниченной ответственностью «Научно-Производственный Центр «Антиград» (Россия); Национальный Центр по Метеорологии Объединенных Арабских Эмиратов.
13. Патент № 2045164 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (1995.01). Устройство для создания тумана и облаков: № 93016204/23: заявл. 29.03.1993: опубл. 10.10.1995 / Козлов В. Н.: заявитель и патентообладатель: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова.
14. Gray W. M., Frank W. M., Corrin M. L. and Stokes C. A. Weather modification by carbon dust absorption of solar energy // Colorado state university. 1974. Res. Rep. № 225. 190 p.
15. Дессенс А. Можем ли мы изменить климат? Л.: Гидрометеоздат, 1969. 115 с.
16. Патент № 2440684 Франция, МПК A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Создание облаков, вызывающих осадки, путем окрашивания почвы: № 7831789: заявл. 10.11.1978: опубл. 06.06.1980, вид публикации B1 / заявители: RASKIN LUCILE.
17. Патент № 2366789 Франция, МПК A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Система формирования дождевых облаков — использует отраженный свет от плоских зеркал для нагрева воздуха, в котором вода конденсируется на высоте: № 7628930: заявл. 17.09.1976: опубл. 05.05.1978, вид публикации A1 / заявители: LAFAURE HENRI FRANCOIS.
18. Патент № 2490067 Франция, МПК A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Криогенное устройство для формирования дождевого облака — выполнено в виде воздушного шара, закрепленного полыми тросами, по которым сжиженный газ и влажный воздух закачиваются в атмосферу: № 8019969: заявл. 16.09.1980: опубл. 19.03.1982, вид публикации A1 / заявители: BELHAMRIBERNARD.

19. Патент № 2191499 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (2000.01). Способ управления погодой: № 2000110406/13: заявл. 13.04.2000; опубл. 27.10.2002, бюл. № 30 / Будко Е. А., Козлов В. Н., Лихачев А. В., Окунев С. М.: заявители Будко Е. А., Козлов В. Н., Лихачев А. В., Окунев С. М.: патентообладатель: Козлов В. Н.
20. Патент № 2462026 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (2006.01). Способ создания восходящего потока воздуха в атмосфере и устройство для его осуществления (гелиатор): № 2011111351/13: заявл. 28.03.2011; опубл. 27.09.2012, бюл. № 27 / Павлюченко В. П.: патентообладатель: Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).
21. Патент № 2377765 Российская Федерация, МПК A01G 13/06 (2006.01). A01G 15/00 (2006.01). Раствор для создания теплых искусственных туманов и облачности нижнего яруса: № 2008121073/12: заявл. 26.05.2008; опубл. 10.01.2010, бюл. № 1 / Серебренников Б. В., Клюев А. М., Ключин А. В., Григорьев А. А., Ферезанова М. В., Сотников Н. В.: заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский военный институт биологической и химической безопасности (СВИБХБ).
22. Патент № 2411813 Великобритания, МПК A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Способ формирования дождевых облаков: № 0405221: заявл. 09.03.200; опубл. 21.04.2004, вид публикации А / заявители: BRODSKI STANISLAV, BRODSKI YEVGENY.
23. Патент № 1491088 Европейское патентное ведомство, МПК A01G 15/00 E01H 13/00. CPC A01G 15/00. Изменение погоды по технологии рояльского дождевания (посредством технологии формирования дождя): № 03020550: заявл. 17.09.2003; опубл. 29.12.2004, вид публикации В1 / заявители: HISMAJESTYKINGBHMIBOL.
24. Патент № 2115296 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (1995.01). E01H 13/00 (1995.01). Способ изменения погоды в локальных зонах приземной атмосферы: № 97110297/13: заявл. 25.06.1997; опубл. 20.07.1998 / Пестов Д. А.: заявитель и патентообладатель: Пестов Д. А.
25. Мазуров Г. И., Нестерук В. Н. Физико-метеорологические условия образования облачных следов за вертолетами // Труды ГМЦ. 1982. Вып. 217. С. 66—78.
26. Патент № 4653690 США, МПК A01G 15/00. CPC A01G 15/00 Y10S 149/117. Способ получения кучевых облаков: № 06668050: заявл. 05.11.1984; опубл. 31.03.1987, вид публикации А / St. Amand Pierre, Mathews Larry A. заявители: The United States of America as represented by the Secretary of the Navy.
27. Edward E. Hindman Water droplet fogs formed from pyrotechnically generated condensation nuclei // Journal of Weather Modification. 1978. V. 10. № 1. P. 77—96.
28. Авторское свидетельство № 651754 СССР, МПК A01G 15/00 (2000.01). Устройство для создания искусственного тумана: № 2393715: заявл. 02.08.1976; опубл. 15.03.1979 / Козлов В. Н., Соболев А. Д., Соболев В. Д.; заявитель: Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского.
29. Авторское свидетельство № 140630 СССР, МПК A01G 15/00 (2000.01). Пиротехнический состав для снаряжения противораковых ракет и патронов: № 684510: заявл. 03.11.1960; опубл. 00.00.1960 / Вернидуб И. И., Шишминцев В. В.; заявители: Вернидуб И. И., Шишминцев В. В.
30. Авторское свидетельство № 1007062 СССР, МПК G01W 1/08 (2000.01). Способ создания искусственных облаков в верхних слоях атмосферы и устройство для его осуществления: № 3412304: заявл. 05.12.1981; опубл. 23.03.1983 / Игнатенко В. И., Мусеев А. С., Степанов А. Б., Шидловский А. А.; заявитель: Центральное конструкторское бюро гидрометеорологического приборостроения Госкомгидромета СССР.
31. Патент № 2007070 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (1990.01). Способ создания искусственного облака в верхней атмосфере земли и устройство для его осуществления: № 925048108: заявл. 16.06.1992 / Гарбузенко В. Ф., Клюев О. Ф., Матухин П. Г., Портнягин Ю. И., Соколов В. В., Шамшев К. Н., Шидловский А. А.: заявитель и патентообладатель: Научно-производственное объединение «Тайфун».
32. Патент № 2264081 Российская Федерация, МПК A01G 15/00 (2000.01). Способ искусственного образования облаков: № 2001114690/12: заявл. 31.05.2001; опубл. 20.03.2003, бюл. № 8 / Лапшин В. Б., Палей А. А.: патентообладатель: Лапшин В. Б.
33. Хоббс П. В. Научные основы, методы и результаты активных воздействий на облака / Изменение погоды человеком. М.: Изд-во «Прогресс», 1972. С. 52—53.

34. A. P. Doronin, Yu. V. Kuleshov, M. V. Petrochenko and G. G. Shchukin Methods of changing the thunderstorm electricity by modifying convective clouds natural and artificial origin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044022 doi:10.1088/1757-899X/698/4/044022.
35. Ким Н. С., Корнеев В. П., Частьухин А. В., Шукин Г. Г. Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака // Ученые записки РГГМУ. 2017. №46. С. 91—99.

References

1. Krasnopeev S. M., Nerov I. O., Bugaets A. N. Remote sensing potential for restoration of a highly detailed DEM of the flooded zone of the riverine floodplain of large rivers. *Geoinformatika = Geoinformatics*. 2022, 4: 28—35. (In Russ.). DOI:10.47148/1609-364X-2022-4.
2. Doronin A. P., Goncharov I. V., Petrochenko V. M., Kozlova N. A., Tymoshchuk A. S. Investigation of the characteristics of convective clouds over the central region of the European part of Russia in relation to the problem of prevention of forest fires and their control. *Uchenyye zapiski RGGMU = Proceedings RSHU*. 2018, 50: 28—40. (In Russ.).
3. Kozlov V. N., Doronin A. P., Petrochenko V. M. Ecological danger of forest fires and methods of its prevention. *Uchenyye zapiski RGGMU = Proceedings RSHU*. 2017, 48: 234—248. (In Russ.).
4. Korneev V. P., Koloskov B. P., Bychkov A. A., Petrunin A. M., Chastukhin A. B. Active effects on clouds in order to improve weather conditions in megacities. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2022, 7: 61—70. (In Russ.).
5. Andreev A. O., Dukalskaya M. V., Golovina E. G. *Oblaka: proiskhozhdeniye, klassifikatsiya, raspoznavaniye = Clouds: origin, classification, recognition*. Edited by Doctor of Geographical Sciences A. I. Ugrumov. Study guide. St. Petersburg, publishing house of RGGMU, 2007: 228 p. (In Russ.).
6. Mazurov G. I., Akselevich V. I., Bidenko S. I. *Mezonevrogeniya oblakov i vozmozhnosti upravleniya ikh evolyutsiyey dlya sozdaniya lokal'nykh blagopriyatnykh pogodnykh usloviy = Cloud mesoneurogenities and the possibilities of controlling their evolution in order to create local favorable weather conditions*. St. Petersburg: "Technolit", 2013: 191 p. (In Russ.).
7. Doronin A. P., Kozlov S. I., Petrochenko V. M., Filippenok V. V. Artificial atmospheric formations: methods and technical means, areas of application. *Trudy VKA imeni A. F. Mozhayskogo = Proceedings of the A. F. Mozhaysky VKA*. 2022, 685: 108—115. (In Russ.).
8. Kozlov V. N., Mazurov G. I., Doronin A. P., Korshun N. A. Physical bases of artificial cloud formation in the upper troposphere. *Trudy GGO = Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov*. 2014, 570: 261—273. (In Russ.).
9. Zaitsev V. A., Kudryavtsev B. P., Ledokhovich A. A. Possibilities and ways of creating artificial cloud fields. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 1977, 3: 3—9. (In Russ.).
10. Detwiler A., Pratt R. Sowing in clean air: opportunities and strategies. *Journal of Weather Change*. 1984, 16, 1: 46—60.
11. Wolfson N. I., Levin L. M. *Meteotron kak sredstvo vozdeystviya na atmosferu. Meteotron as a means of influencing the atmosphere*. Moscow: Moscow Department of Hydrometeoizdat, 1987: 130 p. (In Russ.).
12. Patents No. 2732710 RU, IPC A01G 15/00 (2006.01). SEC A01G 15/00 (2020.02). Method of creating artificial clouds and precipitation : No. 2019110769 : applic. 11.04.2019 : Published: 22.09.2020 Byul. No. 27 / *Abshaev M. T.* (RU) : Patent holders : *Abshaev M. T.* (RU), Limited Liability Company "Scientific and Production Center "Antigrad" (RU), National Center for Meteorology of the United Arab Emirates (AE).
13. Patents No. 2045164 RU, IPC A01G 15/00 (1995.01). Device for creating fog and clouds : No. 93016204/23 : applic. 29.03.1993 : Published: 10.10.1995 / *Kozlov V. N.* : Applicant and patent holder : A. I. Voeikov Main Geophysical Observatory.
14. Gray W. M., Frank W. M., Corrin M. L. and Stokes K. A. Weather change due to the absorption of solar energy by carbon dust. *University of Colorado*, 1974, 225: 190 p.
15. Dessens A. *Mozhem li my izmenit' klimat? = Can we change the climate? L.*: Hydrometeoizdat, 1969: 115 p.
16. Patent No. 2440684 FR, IPC A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Creation of clouds causing precipitation by staining the soil : No. 7831789 : applic. 10.11.1978 : Published: 06.06.1980, Type of publication B1 / Applicants : RUSKIN LUCILLE.

17. Patent No. 2366789 FR, IPC A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Rain cloud formation system - uses reflected light from flat mirrors to heat the air in which water condenses at altitude : No. 7628930 : applic. 17.09.1976 : Published: 05.05.1978, Type of publication A1 / Applicants : LAFORT HENRI FRANCOIS.
18. Patent No. 2490067 FR, IPC A01G 15/00. CPC A01G 15/00. Cryogenic device for forming a rain cloud - made in the form of a balloon fixed with hollow cables through which liquefied gas and moist air are pumped into the atmosphere : No. 8019969 : applic. 16.09.1980 : Published: 19.03.1982, Type of publication A1 / Applicants : BEL HAMRI BERNARD.
19. Patents No. 2191499 RU, IPC A01G 15/00 (2000.01). Weather control method : No. 2000110406/13 : applic. 13.04.2000 : Published: 27.10.2002 Byul. No. 30 / *Budko E. A., Kozlov V. N., Likhachev A. V., Okunev S. M.* : Applicant : Budko E. A., Kozlov V. N., Likhachev A. V., Okunev S. M. : Patent holder : Kozlov V. N.
20. Patents No. 2462026 RU, IPC A01G 15/00 (2006.01). Method of creating an upward airflow in the atmosphere and a device for its implementation (heliator) : No. 2011111351/13 : applic. 28.03.2011 : Published: 27.09.2012 Byul. No. 27 / *Pavlyuchenko V. P.* : Patent holder : Opening of the Russian Academy of Sciences, P. N. Lebedev Academic Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAP).
21. Patents No. 2377765 RU, IPC A01G 13/06 (2006.01). A01G 15/00 (2006.01). Solution for creating warm artificial fogs and clouds of the lower tier : No. 2008121073/12 : applic. 26.05.2008 : Published: 10.01.2010 / *Serebrennikov B. V., Klyev A. M., Klyuzhin A. V., Grigorov A. A., Ferezanova M. V., Sotnikov N. V.* : Applicant and patent holder : Federal state educational institution of higher professional education Saratov state institute of biological and chemical safety (SVIBXB).
22. Patent No. 2411813 UK, IPC A01G 15/00. PDA A01G 15/00. Method of forming rain clouds : No. 0405221 : applic. 09.03.2004 : Published: 21.04.2004, Type of publication A / Applicants : BRODSKI STANISLAV, BRODSKI YEVGENY.
23. Patent No. 1491088 EP, IPC A01G 15/00 E01H 13/00. Changing the weather using Royal sprinkling technology (through rain forming technology) : No. 03020550 : applic. 17.09.2003 : Published: 29.12.2004, Type of publication B1 / Applicants : HIS MAJESTY KING BHUMIBOL.
24. Patents No. 2115296 RU, IPC A01G 15/00 (1995.01). E01H 13/00 (1995.01). Method of changing the weather in local zones of the surface atmosphere : No. 97110297/13 : applic. 25.06.1997 : Published: 20.07.1998 / *Pestov D. A.* : Applicant and patent holder : Pestov D. A.
25. Mazurov G. I., Nesteruk V. N. Physico-meteorological conditions of formation of cloud tracks behind helicopters. *Trudy GMTS = Proceedings GMC.* 1982, 217: 66—78. (In Russ.)
26. Patent No. 4653690 US, IPC A01G 15/00. CPC A01G 15/00 Y10S 149/117. Cumulus cloud production method : No. 06668050 : applic. 05.11.1984 : Published: 31.03.1987, Type of publication A / *St. Amand Pierre, Mathews Larry A.* Applicants : The United States of America as represented by the Secretary of the Navy.
27. Hindman E. E. Water droplet mists formed from pyrotechnically generated condensation nuclei. *Journal of Weather Modification.* 1978, 10. 1: 77—96
28. Copyright certificate No. 651754 SU, IPC A01G 15/00 (2000.01). Device for creating artificial fog : No. 2393715 : applic. 02.08.1976 : Published: 15.03.1979 / *Kozlov V. N., Sobolev A. D., Sobolev V. D.* : Applicant : A. F. Mozhaisky Military engineering red banner institute.
29. Copyright certificate No. 140630 SU, IPC A01G 15/00 (2000.01). Pyrotechnic composition for the equipment of anti-hail missiles and cartridges : No. 684510 : applic. 03.11.1960 : Published: 00.00.1960 / *Vernidub I. I., Shishmintsev V. V.* : Applicant : Vernidub I. I., Shishmintsev V. V.
30. Copyright certificate No. 1007062 SU, IPC G01W 1/08 (2000.01). A method for creating artificial clouds in the upper atmosphere and a device for its implementation : No. 3412304 : applic. 05.12.1981 : Published: 23.03.1983 / *Ignatenko V. I., Museev A. S., Stepanov A. B., Shidlovsky A. A.* : Applicant : Central design bureau of hydrometeorological instrumentation of the USSR state committee for hydro-meteorology.
31. Patents No. 2007070 RU, IPC A01G 15/00 (1990.01). A method for creating an artificial cloud in the upper atmosphere of the earth and a device for its implementation : No. 925048108 : applic. 16.06.1992 / *Garbuzenko V. F., Klyuev O. F., Matukhin P. G., Portnyagin Y. I., Sokolov V. V., Shamshev K. N., Shidlovsky A. A.* : Applicant and patent holder : Scientific and production association «Typhoon».

32. Patents No. 2264081 RU, IPC A01G 15/00 (2000.01). Method of artificial cloud formation : No. 2001114690/12 : applic. 31.05.2001 : Published: 20.03.2003, Byul. No. 8 / *Lapshin V. B., Paley A. A.* : Patent holder : Lapshin V. B.
33. Hobbs P. V. Scientific foundations, methods and results of active effects on clouds. *In the book: "Human weather change"*. M.: Progress Publishing House, 1972: 52—53.
34. Doronin A. P., Kuleshov Yu. V., Petrochenko M. V. and Shchukin G. G. Methods of changing the thunderstorm electricity by modifying convective clouds natural and artificial origin. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044022 doi:10.1088/1757-899X/698/4/044022.
35. *Kim N. S., Korneev V. P., Chastukhin A. V., Shchukin G. G.* Ecological aspects of Russian technologies of active impacts on clouds. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of RGGMU*. 2017. 46: 91—99.

Информация об авторах

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения, doronin52@mail.ru.

Петроченко Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, доцент кафедры технологий и средств геофизического обеспечения, vmpetrochenko@mail.ru.

Козлова Наталья Александровна, кандидат географических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), kozlova.nat2012@mail.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения, ggshchukin@mail.ru.

Филиппёнок Виктор Викторович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, адъюнкт, vitya.fil@mail.ru.

Information about authors

Doronin Alexander Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Professor of the Department of Technologies and Means of Geophysical Support.

Petrochenko Vyacheslav Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Associate Professor of the Department of Technologies and Means of Geophysical Support.

Kozlova Natalia Aleksandrovna, Candidate of Geographical Sciences, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, researcher at the Military Institute (research).

Shchukin Georgiy Georgievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Professor of the Department of Technologies and Means of Geophysical Support.

Filippenok Viktor Viktorovich, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, adjunct.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.04.2023

Принята в печать 14.05.2023

The article was received on 10.04.2023

The article was accepted 14.05.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 249—259.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):249—259.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.515.8:551.501.81
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-249-259

Совершенствование методики исследований мезоструктуры атмосферных фронтов на основе применения наземной микроволновой радиометрии

***Александр Николаевич Ефременко¹, Дмитрий Михайлович Караваев¹,
Андрей Борисович Лебедев², Наталья Олеговна Моисеева³,
Георгий Георгиевич Щукин^{1,4}***

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, lebandbor@rambler.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Муромский институт (филиал) ВлГУ имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муром, Россия

Аннотация. В статье описана методика исследования мезомасштабной структуры атмосферных фронтов с использованием данных наземных микроволновых радиометров водяного пара. Методика продемонстрирована на примере мезомасштабного анализа последовательного прохождения теплого и холодных фронтов через Ленинградскую область 9—10 сентября 2020 г. В работе одновременно изучаются возможности микроволнового радиометра водяного пара по выявлению мезомасштабных особенностей атмосферных фронтов, и исследуется мезоструктура этих синоптических объектов. Полученные оценки пространственных характеристик атмосферных фронтов для рассматриваемого района отличаются от аналогичных характеристик, полученных П. Хоббсом для северо-восточного побережья Северной Америки.

Ключевые слова: атмосферный фронт, влагозапас атмосферы, влагозапас облаков, мезомасштабная структура, микроволновый радиометр

Благодарности: работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-19-00378), <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.

Для цитирования: Ефременко А. Н., Караваев Д. М., Лебедев А. Б., Моисеева Н. О., Щукин Г. Г. Совершенствование методики исследований мезоструктуры атмосферных фронтов на основе применения наземной микроволновой радиометрии // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 249—259. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-249-259.

Original article

Improvement of research methodology mesostructures of atmospheric fronts on the basis of ground-based microwave radiometry

*Alexander N. Efremenko¹, Dmitry M. Karavaev¹,
Andrey B. Lebedev², Natalya O. Moiseeva³, Georgy G. Schukin^{1,4}*

¹ Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³ St Petersburg State University of civil aviation, St. Petersburg, Russia

⁴ Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia

Summary. The paper considers the some results of experimental studies of the mesoscale structure of atmospheric fronts using a ground-based microwave water vapor radiometer. A methodology for studying the mesoscale structure of atmospheric fronts is described, which includes two stages: the stage of synoptic (frontological) analysis and the stage of mesoscale analysis based on measurements of atmospheric moisture and cloud liquid water content using a microwave water vapor radiometer. The application of the methodology is demonstrated by the example of the analysis of the results of observation of the case of the passage of warm and cold fronts through the Leningrad region on September 9—14, 2020. Based on the analysis of the results of previous studies, the features of changes in the characteristics of moisture content during the passage of atmospheric fronts are generalized. The growth of the atmospheric water vapor and cloud liquid water content is delayed relative to the appearance of harbingers of a warm cloud front of the upper tier. The growth of moisture content characteristics has a wave-like character, which can be explained by the manifestation of the strip mesostructure of the front. Estimates of the characteristic scales of spatial heterogeneities in the structure of atmospheric fronts for the area under consideration differ from similar characteristics obtained by P. Hobbs for the northeastern coast of North America. In the course of mesoscale analysis, the type of atmospheric front crossing the observation point can be clarified. The results obtained determine the prospects for improving the methods of diagnostics and current forecasting of dangerous weather phenomena during the passage of atmospheric fronts using ground-based microwave radiometers.

Keywords: atmospheric front, integrated water vapor, cloud liquid water content, mesoscale structure, microwave radiometer

Acknowledgments: The work was supported by a grant of Russian Science Foundation (Project 21-19-00378), <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>

For citation: Efremenko A. N., Karavaev D. M., Lebedev A. B., Moiseeva N. O., Schukin G. G. Improvement of research methodology mesostructures of atmospheric fronts on the basis of ground-based microwave radiometry. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):249—259. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-249-259.

Введение

Повышение качества краткосрочных метеорологических прогнозов достигается, как правило, привлечением дополнительной информации, в качестве которой могут выступать как данные измерений новых приборов, так и более полные знания об атмосферных процессах, обуславливающих погоду. В настоящей работе применяются оба вышеупомянутых подхода. Изучается мезомасштабная

структура атмосферных фронтов с помощью наземного микроволнового радиометра водяного пара (РВП).

О завершенности прикладных научных исследований можно судить по тому признаку, насколько результаты этих исследований вошли в руководящие документы, учебную и справочную литературу. Сведения о мезомасштабной структуре атмосферных фронтов наиболее полно были обобщены Н. Ф. Вельтищевым в 1988 г. в Технической записке ВМО №701 [1], которая является одновременно и руководящим документом ВМО, и учебным пособием для студентов. Руководство по краткосрочному прогнозированию [2], которым пользуются и по настоящее время, было опубликовано двумя годами ранее и не включало данных о мезоструктуре фронтов. В последующие годы как в отечественных руководящих документах (например, РД 52.27.723-2009), так и в учебной литературе [3] новых сведений по данному вопросу не появилось. Следует отметить, что классификация и пространственно-временные характеристики мезоструктуры атмосферных фронтов, приводимые в работе [1], основываются на выполненном П. Хоббсом обобщении случаев прохождения циклонов по северо-восточному побережью Северной Америки. Очевидно, что условия цикло- и фронтогенеза в этом регионе существенно отличаются от условий развития циклонов и фронтов для различных регионов Евразии. Целью данной работы является исследование пространственной мезоструктуры атмосферных фронтов над Санкт-Петербургом и Ленинградской областью.

Методика исследований

Методика проводимых исследований представляет собой анализ прохождения атмосферных фронтов различных типов через станции наблюдений в Ленинградской области, вблизи которых установлены микроволновые радиометры водяного пара.

Анализ условно можно разделить на два этапа. В ходе первого этапа — комплексного синоптического анализа — выявляется сам факт прохождения атмосферного фронта через район измерений, идентифицируется тип фронта и определяется период его прохождения. Кроме того, определяется целесообразность дальнейшего исследования прохождения фронта. Отбираются случаи, когда атмосферные фронты пересекают пункты наблюдений в направлении близком к нормальному относительно линии фронта вблизи подстилающей поверхности. В ходе второго этапа — мезомасштабного анализа с использованием данных радиометрических измерений — уточняются сроки прохождения атмосферного фронта и выявляются мезомасштабные особенности его структуры, которые сравниваются с данными ранее выполненных исследований [4—6] и результатами других авторов [1, 7—8].

В ходе комплексного синоптического анализа на основе имеющегося в наличии аэросиноптического материала, спутниковых изображений, архивов наземных метеорологических наблюдений проводится классический фронтологический анализ, порядок выполнения которого изложен в [2]. В случаях, когда имеется неоднозначность в определении положения фронтов, дополнительно

учитываются закономерности взаимного расположения атмосферных фронтов и струйных течений.

Для определения сроков прохождения фронтов через пункт наблюдений анализируются кольцевые карты погоды совместно с данными наземных метеорологических измерений. Исходя из закономерностей изменения метеорологических величин при прохождении атмосферных фронтов различных типов:

— за начало прохождения теплого фронта или фронта окклюзии принимается срок, в который было отмечено появление сплошной облачности верхнего яруса;

— за завершение прохождения теплого фронта — срок с правым поворотом ветра или прекращением выпадения обложных осадков;

— за начало прохождения холодного фронта — срок также с правым поворотом ветра или прекращением выпадения ливневых осадков из предфронтальной гряды кучево-дождевых облаков;

— за завершение прохождения холодного фронта или фронта окклюзии — срок, в который было отмечено уменьшение количества облаков верхнего (при их отсутствии — среднего) яруса менее значительной.

Ввиду того, что процесс развития каждого атмосферного фронта является по-своему уникальным, вопрос об использовании критериев начала и завершения прохождения атмосферных фронтов в каждом конкретном случае решается индивидуально.

Мезомасштабный анализ основывается главным образом на результатах измерений радиометра водяного пара. При анализе используются интегральные характеристики влагосодержания атмосферы: влагозапас атмосферы и водозапас облаков.

Под влагозапасом атмосферы Q понимается интегральное содержание (масса) водяного пара в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения. Под водозапасом облаков W — суммарное содержание жидкокапельной влаги и кристаллов льда в том же объеме воздуха. Методические вопросы определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным радиотеплолокационных измерений вблизи линии водяного пара 22,236 ГГц, на частотах 20,7 ГГц и в «окне прозрачности» атмосферы 31,4 ГГц подробно рассмотрены в [4]. Сравнение оценок влагозапаса атмосферы, полученных по результатам радиометрических измерений, с данными аэрологического зондирования атмосферы показывает, что точность определения влагозапаса атмосферы в пределах $1,0 \text{ кг/м}^2$ [5].

При проведении мезомасштабного анализа выявляются особенности прохождения атмосферного фронта во временном ходе влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, полученных по данным радиометрических измерений. Период прохождения атмосферных фронтов определен ранее в ходе выполнения первого этапа — фронтологического анализа. Первоначально определяются фоновые значения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, которые наблюдались до и после прохождения атмосферных фронтов, а также период запаздывания начала роста характеристик интегрального паро- и влагосодержания относительно момента принятого за начало или окончание прохождения фронта. Полосовая структура

выпадения осадков проявляется в волнообразном изменении рассматриваемых характеристик содержания парообразной и жидкокапельной влаги при прохождении фронтов, поэтому определяются параметры волнообразного изменения этих характеристик (длина волны, амплитуда, тенденция изменения, число волн и т.п.). Полученные параметры сравниваются с аналогичными для других случаев прохождения атмосферных фронтов. Кроме того, сопоставляются оценки пространственных размеров полос осадков с данными, полученными П. Хоббсом [1] для атмосферных фронтов северо-восточного побережья Северной Америки.

Ниже будет рассмотрен случай, который продемонстрирует возможности анализа с использованием результатов радиометрических измерений по уточнению периода прохождения фронтов, идентификации типа фронта и выявлению их мезомасштабной структуры.

Анализ случаев прохождения атмосферных фронтов через Санкт-Петербург 9—10 сентября 2020 г.

Использование классического фронтологического анализа позволило сделать вывод о прохождении в период с 9 ч СГВ (среднего времени по Гринвичу) 9 сентября 2020 г. до 6 ч СГВ 10 сентября 2020 г. через ст. Санкт-Петербург фронта окклюзии по типу холодного фронта (рис. 1).

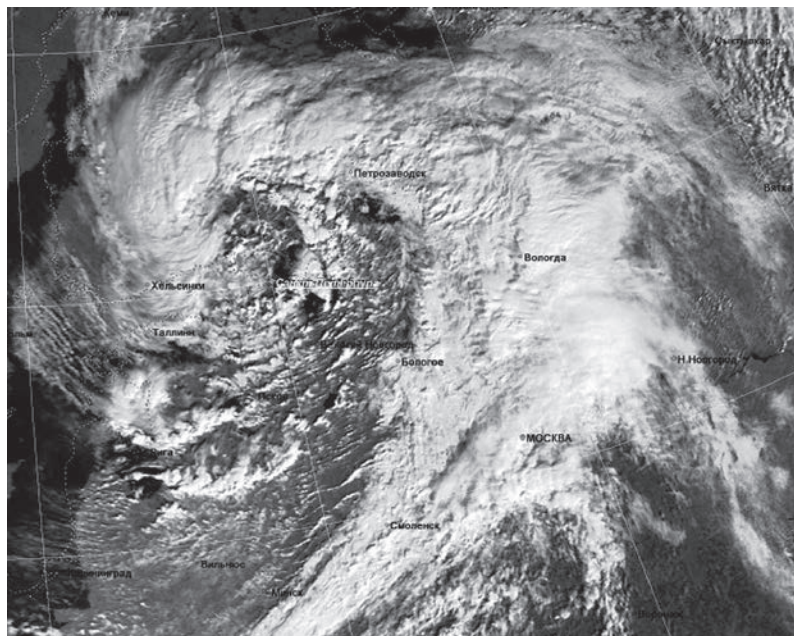


Рис. 1. Изображение фронтальной облачности циклона
10 сентября 2020 г. 08 ч. СГВ (NOAA-18, AVHRR, 0,72 1,1 мкм).

Fig. 1. Satellite map of cloudiness on September 10, 2020 at 08 h GMT.

В утренние часы 9 сентября наблюдалась сплошная низкая слоистая облачность после выпавших накануне ливневых осадков, не являющаяся атрибутом прохождения фронта данного типа. За момент начала прохождения фронта был условно принят срок 09 ч 9 сентября, в который были отмечены значительная облачность верхнего яруса, характерная для прохождения фронта окклюзии, рассеяние слоистых облаков и последующая их трансформация в облачность кучевых форм. При этом в 15 ч был отмечен поворот ветра с западного на южный, который свидетельствовал о прохождении через пункт наблюдений оси барического гребня, что также не является признаком прохождения фронта.

За момент завершения прохождения фронта был условно принят срок 06 ч 10 сентября, в котором уже не наблюдалось выпадение обложных осадков. По данным наземных наблюдений, более точно определить момент завершения прохождения фронта не представляется возможным, так как исчезновение облачности среднего яруса, которое могло бы об этом свидетельствовать, было замаскировано значительной облачностью кучевых форм неустойчивой воздушной массы в тыловой части циклона (рис. 1).

По данным радиометрических измерений (рис. 2) прохождение фронта проявляется в относительно плавном росте влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, а затем в более резком уменьшении их интегральных характеристик.

За фоновые значения (значения, при которых влияние фронта по данным РВП не проявляется) приняты минимальные значения влагозапаса атмосферы $15,0 \text{ кг/м}^2$ и водозапаса облаков $0,016 \text{ кг/м}^2$, наблюдавшиеся в полуденные часы 09 сентября при сплошной облачности верхнего яруса и минимальном количестве облаков нижнего яруса. Рост влагозапаса атмосферы начинается после 12 ч 15 мин 9 сентября и несколько запаздывает относительно появления предвестников прохождения фронта — облаков верхнего яруса. Данная особенность выявлена ранее [6] и может быть объяснена тем, что кристаллические облака, которыми преимущественно являются перистые облака, слабо влияют на перенос радиотеплового излучения [9].

Момент начала роста влагозапаса атмосферы совпадает с началом всплеска водозапаса облаков, который наблюдался в период с 12 ч 15 мин до 12 ч 45 мин и имел максимальное значение $0,134 \text{ кг/м}^2$. Всплеск водозапаса облаков мог быть обусловлен прохождением отдельного кучевого облака.

После всплеска водозапас облаков принимает фоновые значения, а влагозапас атмосферы уменьшается от значения $17,5 \text{ кг/м}^2$ до значения $16,5 \text{ кг/м}^2$, а затем продолжает постепенный рост. Рост водозапаса атмосферы, обусловленный влиянием облачности кучевых форм, снова начинается после 13 ч 40 м, достигает максимальных значений $0,312 \text{ кг/м}^2$ в 13 ч 55 м, а затем начинает постепенное понижение, и опять достигает фоновых значений к 17 ч. 00 мин. Вышеупомянутое наличие облачности кучевых форм является специфичным для данного конкретного фронта. К этому моменту значения влагозапаса атмосферы достигли значения $22,1 \text{ кг/м}^2$.

После 17 ч 00 мин 9 сентября начинается более крутой рост водозапаса облаков — существенно позже относительно момента времени начала роста влагозапаса атмосферы, что можно объяснить усилением процессов облако- и

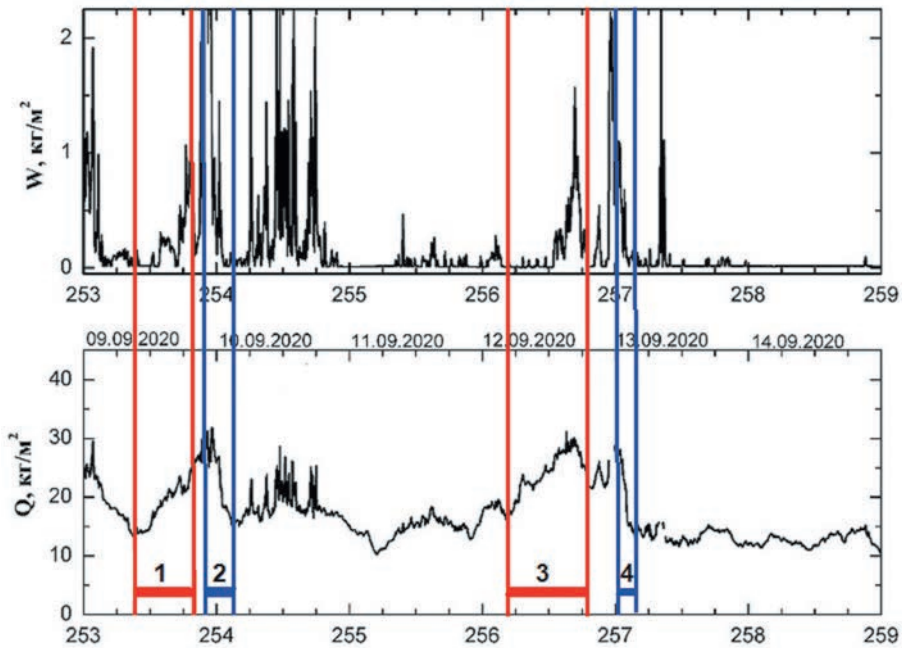


Рис. 2. Временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков 9—14 сентября 2020 г. в г. Санкт-Петербург.

1—4 — периоды прохождения фронтов: 1, 3 — теплых фронтов; 2, 4 — холодных фронтов.

Fig. 2. Time series of integrated water vapor and of cloud liquid water content measured by WVR from September 11 to 14, 2020 in St. Petersburg region.

1—4 — periods of passage of fronts: 1, 3 — warm; 2, 4 — cold.

осадкообразования. Рост водозапаса облаков при прохождении фронта (рис. 2) имел не монотонный характер, а был промодулирован волнами более высокой частоты. Первая волна наблюдалась в период с 17 ч 05 мин до 18 ч 15 мин, имела двухгорбую форму, водозапас облаков при этом вырос от фоновых значений $0,52 \text{ кг/м}^2$ (наблюдались в период с 17 ч 20 мин до 17 ч 30 мин). Вторая волна наблюдалась в период с 18 ч 15 мин до 18 ч 55 мин, имела также двухгорбую форму, а водозапас облаков при этом увеличился от $0,36 \text{ кг/м}^2$ до $1,07 \text{ кг/м}^2$. Третья волна наблюдалась в период с 19 ч 00 мин до 19 ч 30 мин, имела двухгорбую форму, водозапас облаков увеличился от $0,55 \text{ кг/м}^2$ до $1,07 \text{ г/м}^2$.

В период с 19 ч 35 мин до 20 ч 05 мин наблюдалось монотонное уменьшение водозапаса облаков до значений $0,10 \text{ кг/м}^2$, а затем до 21 ч 00 мин — плавный рост водозапаса до значений $0,40 \text{ кг/м}^2$. Данный эффект не удалось теоретически объяснить с использованием типовых схем фронтов окклюзий с учетом мезомасштабных особенностей. Был учтен тот факт, что фронт проходил через ст. Санкт-Петербург вблизи точки окклюзии. Авторы сравнили ход изменения интегральных характеристик влажности данного случая с ходом изменения этих характеристик

в теплых секторах циклонов ранее рассмотренных случаев [6]. Характер изменения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков во всех случаях был аналогичным, поэтому авторы пришли к выводу, что рассматриваемый случай является последовательным прохождением теплого и холодного фронтов в системе фронтального циклона. Вышеописанные волны следует отнести, согласно классификации П. Хоббса [1], к полосам осадков на теплом фронте. Тогда, теплый фронт проходил в период с 9 ч 00 мин до 20 ч 05 мин 9 сентября 2020 г.

По данным работы [1], на теплом фронте полосы осадков имеют ширину порядка 50 км, расстояние между соседними полосами составляет порядка 100 км. На изобарической поверхности 700 гПа, которую обычно принимают за уровень ведущего потока, по данным комплексного температурно-ветрового зондирования 10 сентября 2020 г 00 ч СГВ на ст. Воейково скорость ветра составляла 15 м/с (54 км/ч). Для расчета скорости перемещения фронта скорость ветра умножают на коэффициент приведения, который для теплого фронта составляет 0,8. Таким образом, перемещение полосы осадков шириной 50 км со скоростью 43 км/ч должна составлять порядка 1 ч 10 мин. Размеры полос осадков теплого фронта в Ленинградской области существенно меньше, чем получены в [1].

Теперь уже, в теплом секторе циклона было отмечено волновое изменение водозапаса облаков в период 21 ч 00 мин — 21 ч 35 мин с максимумом водозапаса облаков 2,07 кг/м². Особенностью максимумов в теплых секторах циклонов является относительно равномерный монотонный рост и уменьшение водозапаса облаков.

Согласно типовой схеме прохождения облачности холодного фронта, перед линией прохождения холодного фронта вблизи поверхности проходит гряда кучево-дождевой облачности. Данная гряда по радиометрическим данным наблюдалась в период с 21 ч 40 мин до 22 ч 30 мин. Максимальные значения водозапаса облаков достигали 4,09 кг/м², а затем уменьшились до значений 1,97 кг/м². Таким образом, момент начала прохождения холодного фронта приходится на 22 ч 30 мин 10 сентября 2020 г.

Уменьшение водозапаса облаков при прохождении холодного фронта (рис. 2) имеет не монотонный характер, а промодулирован волнами более высокой частоты. Первая волна наблюдалась в период с 22 ч 30 мин до 23 ч 20 мин, имела трехгорбую форму, водозапас облаков достигал значений 3,35 кг/м², затем уменьшился до 0,38 кг/м². Вторая волна наблюдалась в период с 23 ч 20 мин 9 сентября до 00 ч 05 мин 10 сентября, имела одногорбую форму, водозапас облаков увеличился до 0,96 кг/м², затем уменьшился до 0,12 кг/м². Третья волна наблюдалась в период с 00 ч 05 мин до 1 ч 15 мин 10 сентября СГВ, имела трехгорбую форму, водозапас облаков достигал 1,44 кг/м², затем уменьшился до фоновых значений. Значения влагозапаса атмосферы в этот момент достигали значений 1,80—1,85 кг/м², а фоновых значений влагозапас атмосферы достиг в 04 ч 05 мин. Данный момент следует считать моментом завершения прохождения холодного фронта.

В соответствии с экспериментальными данными, изложенными в [1], в теплом секторе циклона полосы осадков имеют ширину порядка 50 км, а полосы осадков на холодном фронте наблюдаются двух видов: одни (на некотором удалении

от линии фронта) имеют ширину порядка 50 км; другие (вблизи линии фронта) имеют ширину порядка 5 км. Пространственные параметры полос осадков теплого сектора циклона и холодного фронта по результатам их оценивания с помощью радиометрических измерений лучше согласуются с данными П. Хоббса [1].

На рис. 2 также представлен случай последовательного прохождения тепло-го и холодного фронтов в период с 12 по 13 сентября 2020 г., который детально проанализирован в [6]. Мезомасштабные особенности прохождения фронтов аналогичны рассмотренному выше случаю. Для сравнения на рис. 2 также приведен суточный ход характеристик влагосодержания атмосферы 14 сентября 2020 г. при антициклоническом типе синоптической ситуации.

Аналогичные результаты об особенностях прохождения атмосферных фронтов получены в работах [5, 6], а также подтверждаются при анализе случаев прохождения атмосферных фронтов с помощью данных радиометрических измерений за достаточно длительный период времени, начиная с 90-х гг.

Заключение

В работе показаны возможности совершенствования методики комплексного синоптического анализа атмосферных фронтов [2], которая используется и в настоящее время в оперативной работе. Применение радиометрической информации позволяет уточнить тип фронта, период прохождения фронтов через пункт наблюдений, а также особенности его мезомасштабной структуры, что может быть использовано при уточнении синоптического положения над пунктом наблюдений и при текущем сверхкраткосрочном прогнозировании.

Применение настоящей методики позволило выявить особенности изменения интегральных характеристик влажности атмосферы при прохождении тепло-го и холодного фронтов и их регистрации с помощью РВП:

— запаздывание роста влагозапаса атмосферы относительно появления предвестников появления теплого фронта — облаков верхнего яруса;

— запаздывание роста водозапаса облаков относительно начала роста влагозапаса атмосферы;

— рост водозапаса облаков при прохождении теплого фронта и уменьшение водозапаса облаков при прохождении холодного фронта не является монотонным, а промодулировано волнами, которые можно объяснить прохождением полос осадков;

— ширина полос осадков во фронтальной облачности увеличивается по мере удаления от линии фронта, проведенной вблизи подстилающей поверхности;

— пространственно-временные характеристики мезомасштабных особенностей атмосферных фронтов в Ленинградской области не соответствуют данным, полученным П. Хоббсом в работе [1], и требуют уточнения.

Поскольку выполненные исследования мезоструктуры атмосферных фронтов относятся к теплomu времени года, то в дальнейшем планируется провести аналогичный анализ для холодного времени года.

В настоящее время пространственно-разнесенная система радиометрических измерений в Ленинградской области расширяется [6]. Радиометры водяного

пара предполагается установить не только на исследовательских площадках, но и в оперативных метеорологических подразделениях. К мезомасштабному анализу предполагается привлечь также данные наземных радиолокационных наблюдений и данные непрерывных наблюдений за облачностью и осадками в периоды прохождения атмосферных фронтов. Регулярное и детальное изучение атмосферных фронтов позволит получить не только достоверную статистику по их пространственно-временным характеристикам, но и создать более надежную методику анализа и прогнозирования прохождения атмосферных фронтов.

Список литературы

1. Вельтищев Н. Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: сб. лекций. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 137 с.
2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 704 с.
3. Толмачева Н. И. Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов: уч. пос. Пермь: Перм. ун-т, 2010. 200 с.
4. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Определение содержания парообразной и жидкокапельной влаги из измерений микроволнового излучения атмосферы. // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 12. С. 942—953. doi:10.52452/00213462_2021_64_12_942.
5. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозовых процессов и выявления зон обледенения в облаках на основе комплексного использования методов активной и пассивной радиолокации // Гидрометеорология и экология. 2021. Вып. 62. С. 7—26. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-7-26.
6. Караваев Д. М., Лебедев А. Б., Шукин Г. Г. и др. Перспективы применения методов наземной микроволновой радиометрии для синоптического анализа атмосферных фронтов и прогноза опасных явлений погоды // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 56—65. doi: 10.52002/0130-2906-2022-12-56-65.
7. Мазин И. П., Шметтер С. М. Облака: строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 279 с.
8. Knupp K. R., Coleman T., Philips D., et al. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions. — J. Atmos. Oceanic Technol., 2009, vol. 26, no 6, pp. 1057—1073. doi: 10.1175/2008JTCNA1150.1.
9. Мазин И. П., Хргиан А. Х. Облака и облачная атмосфера: справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1989, 648 с.
10. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 280 с.

References

1. Veltischev N. F. *Mesometeorology and short-term forecasting*. WMO technical note N 701. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1988: 136 p. (In Russ.).
2. *Guide to short term weather forecasts. Guidance document 1*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1986: 703 p. (In Russ.).
3. Tolmacheva N. I. *Distantionnyye metody issledovaniya mezometeorologicheskikh protsessov: uchebnik = Remote methods for studying mesometeorological processes: textbook*. Perm: Perm. University, 2010. 200 p. (In Russ.).
4. Karavaev D. M., Shchukin G. G. Determination of integrated water vapor and liquid water contents from the measurements of microwave atmospheric radiation. *Izvestiya vuzov. Radiofizika = Radiophysics and Quantum Electronics*. 2022:12(64):846—856. (In Russ.). doi:10.1007/s11141-022-10183-2.
5. Karavaev D. M., Shchukin G. G. Improvement of methods for early warning of thunderstorm and identification of icing zones in clouds based on the integrated use of active and passive radar techniques

- Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021; (62): 7—26. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-7-26.
6. Karavaev D. M., Lebedev A. B., Shchukin G. G., Ilyin G.N. Prospects for application of ground-based microwave radiometry for analysis of atmospheric fronts and early prediction of severe weather events. *Meteorologiya i gidrologiya. = Meteorology and hydrology*. 2022; (12): 56—65. (In Russ.). doi: 10.52002/0130-2906-2022-12-56-65.
 7. Mazin I. P., Shmetter S. M. *Oblaka: stroeniye i fizika obrazovaniya. = Clouds: structure and physics of education*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1983: 279 p. (In Russ.).
 8. Knupp K. R., Coleman T., Philips D. et.al. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009; (26): 1027—1073. doi: 10.1175/2008JTECHA1150.1.
 9. Mazin I. P., Khragian A. Kh. *Oblaka i oblachnaya atmosfera: spravochnik. = Clouds and cloudy atmosphere: a handbook*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1989: 648 p. (In Russ.).
 10. Kondratiev K. Ya., Timofeev Yu. M. *Meteorologicheskoye zondirovaniye atmosfery iz kosmosa. = Meteorological sounding of the atmosphere from space*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1978: 280 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ефременко Александр Николаевич, канд. тех. наук, начальник отдела, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, vka@mil.ru.

Каравеев Дмитрий Михайлович, канд. тех. наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, vka@mil.ru.

Лебедев Андрей Борисович, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, lebandbor@rambler.ru.

Моисеева Наталья Олеговна, канд. тех. наук, доцент кафедры авиационной метеорологии и климатологии, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, natali.ziadinova@yandex.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии и средств геофизического обеспечения, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, vka@mil.ru.

Information about authors

Efremenko Alexander Nikolaevich, PhD (Tech. Sci.), head of the department, Mozhaisky Military Space Academy.

Karavaev Dmitry Mikhailovich, PhD (Tech. Sci.), Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy.

Lebedev Andrey Borisovich, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Protection of Atmosphere, Russian State Hydrometeorological University.

Moiseeva Natalya Olegovna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor of the Department of Aviation Meteorology and Climatology, St Petersburg State University of civil aviation.

Georgy Geogievich Schukin, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Professor of the Department of Technology and Geophysical Support, Mozhaisky Military Space Academy.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.04.2023

Принята к печати после доработки 25.05.2023

The article was received on 24.04.2023

The article was accepted after revision on 25.05.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 260—276.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):260—276.

Научная статья
УДК [551.524.3:551.465.7](265.53)(265.54)
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-260-276

Особенности формирования крупных положительных аномалий температуры воздуха в прибрежных районах Охотского и Японского морей в 1950—2021 гг.

*Татьяна Александровна Шатилина¹, Гурам Шалвович Цициашвили²,
Татьяна Вадимовна Радченкова²*

¹ Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия, tatyana.shatilina@tingo-center.ru

² Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики ИПМ ДВО РАН, г. Владивосток, Радио 7, тел. 231-23-75, guram@iam.dvo.ru, tarad@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются крупные положительные аномалии температуры воздуха в прибрежных районах Охотского и Японского морей в период 1950—2021 гг. по данным метеорологической сети. Рассчитывается внутригодовой ход количества и частоты появления крупных положительных аномалий температуры воздуха в периоды 1950—1979 и 1980—2021 гг. Показано, что частота появления этих аномалий во все месяцы года в период 1980—2021 гг. значительно выше, чем в период 1950—1979 гг. Различие между климатическими особенностями в периоды 1950—1979 гг. и 1980—2021 гг. обусловлено изменениями циркуляционного режима в центрах действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона. В зимние периоды 1980—2021 гг. частота появления крупных положительных аномалий определяется режимом тропосферной ложбины у восточного побережья Азии и положением охотского тропосферного циклона.

Ключевые слова: прибрежные районы Охотского и Японского морей, частота появления крупных аномалий температуры воздуха, изменчивость циркуляции

Для цитирования: Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В. Особенности формирования крупных положительных аномалий температуры воздуха в прибрежных районах Охотского и Японского морей в 1950—2021 гг. // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 260—276. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-260-276.

Original article

Feature of the formation of major positive air temperature anomalies in the coastal areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan in 1950—2021

*Tatiana A. Shatilina¹, Guram Sh. Tsitsiashvili²,
Tatiana V. Radchenkova²*

¹ Research institute of fisheries and oceanography, VNIRO, pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

² Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia

Summary. Major positive air temperature anomalies in the coastal areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan in 1950—2021 are considered according to the meteorological network. The intra-annual variation in the number and frequency of occurrence of major positive air temperature anomalies in the periods 1950—1979 and 1980—2021 are calculated. It is shown that the frequency of occurrence of these anomalies in all months of the year in 1980—2021 is much higher than in 1950—1979. The maximum number of the anomalies was indicated through January to March of 1980—2021 in the northern part of the Sea of Okhotsk. The maximum frequency of occurrence of the anomalies was in March for all stations of the Sea of Okhotsk. What about the stations situated in the coastal areas of the Sea of Japan, the maximum frequency of occurrence of the anomalies was indicated in May. It is shown that the difference between the climatic peculiarities of 1950—1979 and 1980—2021 were determined by changes of the circulation regime in the centers of action of the Asia-Pacific region atmosphere. During winter periods of 1980—2021, the frequency of occurrence of major positive anomalies was determined by the tropospheric through regime near the eastern coast of Asia and by the position of the Okhotsk tropospheric cyclone while in warm periods of 1980—2021 it was determined by the circulation regime variability in the area of the Asia depression and of the Hawaiian anticyclone, their intensity being increased as compared to those of 1950—1979.

Keywords: coastal areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan, frequency of occurrence of major air temperature anomalies, variability of circulation

For citation: Shatilina T. A., Tsitsiashvili G. Sh., Radchenkova T. V. Feature of the formation of major positive air temperature anomalies in the coastal areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan in 1950—2021. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):260—276. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-260-276.

Введение

В настоящее время в связи с глобальным потеплением климата и увеличением повторяемости и интенсивности крупных аномалий гидрометеорологических явлений большое внимание уделяется их анализу. Так, в работе [1] рассмотрены особенности пространственно-временной изменчивости экстремальных характеристик температурного режима и осадков в Северном полушарии.

Регионы Охотского и Японского морей имеют для России особое экономическое значение. Экстремальные похолодания в прибрежных районах Охотского моря являются причиной тяжелых ледовых условий и негативно влияют на производство охотской сельди. Значительная роль экстремальных факторов среды в формировании численности горбуши и условий ее миграций в прибрежные

районы Курильских о-в, Восточного Сахалина и Японского моря показана в работах [2, 3].

В тоже время механизм влияния колебаний климата на численность тихоокеанских лососей изучен недостаточно [4], что затрудняет прогноз величины уловов в различных промысловых зонах. Это же относится и к другим промысловым объектам (минтай, сайра, сардина) Дальнего Востока.

В ряде работ [5, 6] большое внимание уделяется крупномасштабной изменчивости среды и недостаточное внимание анализу внутригодовой изменчивости крупных аномалий и механизмам их формирования. Проблема прогнозирования динамики численности гидробионтов не может быть решена успешно без обобщения данных о текущем состоянии региональных климатических систем и оценки степени ее экстремальности.

На формирование крупных аномалий температуры воздуха большое влияние оказывают положение и интенсивность региональных центров действия над Дальним Востоком. На связь температуры воздуха с центрами действия атмосферы (ЦДА) указывалось в работе [7]. Установлено, что ЦДА являются информативными характеристиками для прогноза приземной температуры воздуха.

В данной работе рассматриваются аномалии интенсивности региональных ЦДА: Охотский тропосферный циклон (ОТЦ), летняя дальневосточная депрессия (ЛДД), охотский антициклон (ОА), азиатская депрессия (АД), западный отрог гавайского антициклона (ГА).

Цель статьи — оценить количество и частоту появления крупных положительных аномалий температуры воздуха в прибрежных районах Японского и Охотского морей и выявить влияние на них региональных ЦДА. Для этого необходимо провести сравнительную оценку внутригодового хода крупных аномалий температуры воздуха для ряда станций, расположенных в различных климатических зонах Дальнего Востока, а также определить районы и месяцы с наибольшими изменениями приземной температуры воздуха и установить связь крупных аномалий температуры воздуха с интенсивностью региональных центров действия атмосферы.

Данные и методы

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) рекомендует рассчитывать климатологические стандартные нормы [8] как средние данные за ближайший к текущему времени 30-тилетний базисный период, который завершается годом с последней цифрой 0. Нами в качестве базисного периода для расчета аномалий температуры воздуха был выбран период 1981—2010 гг.

Данные о температуре воздуха на ГМС Японии размещены на сайте https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3_en.php?block_no=47421&view=1. Данные о температуре воздуха на прибрежных ГМС России были получены из архивов ВНИИГМИ МЦД за период 1950—2021 гг.

Для расчета крупных аномалий температуры воздуха применяется метод, изложенный в работе [9]. Критерием появления крупной положительной аномалии

температуры воздуха в фиксированный момент времени исследуемого периода является отклонение температуры от среднего на величину $1,2\sigma$, где σ — стандартное отклонение. Для сравнительной оценки внутригодового хода числа лет и частоты появления крупных аномалий температуры воздуха выбраны периоды 1950—1979 и 1980—2021, которые отличаются интенсивностью циркуляции в ЦДА [10]. В табл. 1 представлены координаты станций, выбранные для расчета.

Таблица 1

Координаты гидрометеорологических станций (ГМС)

Coordinates of hydro-meteorological stations (GMS)

ГМС	Координаты	ГМС	Координаты
Станции бассейна Охотского моря		Станции бассейна Японского моря	
Охотск	59°22' с.ш. 143°12' в.д.	Советская Гавань	49° с.ш. 140°8' в.д.
Поронайск	49°13' с.ш. 143°06' в.д.	Рудная Пристань	44°22' с.ш. 135°51' в.д.
Усть-Хайрюзово	57°05' с.ш. 156°42' в.д.	Углегорск	49°04' с.ш. 142°02' в.д.
Курильск	45°15' с.ш. 147°53' в.д.	Вадзима	37°23,4' с.ш. 136°53,7' в.д.
Абашири	44°01' с.ш. 144°16,7' в.д.		

Далее в работе использовался этот критерий появления крупных аномалий. Выбор станций для выявления числа лет с крупными аномалиями проводился с таким расчетом, чтобы они располагались в разных климатических зонах: северный район (57 — 70° с.ш., 120 — 160° в.д.), умеренный район (45 — 55° с.ш., 120 — 160° в.д.), южный район (30 — 40° с.ш., 120 — 160° в.д.) (табл. 1).

Также была рассчитана частота f превышения значения $1,2\sigma$, как отношение количества крупных аномалий температуры воздуха к длине ряда. Частота f является вероятностно-статистической оценкой временного ряда [11].

Для оценки изменчивости атмосферной циркуляции рассчитывались аномалии приземного давления P_0 и геопотенциала H_{500} в ЦДА, которые характеризуют региональные особенности температурных и циркуляционных условий в целом для районов их расположения: АД — (25° — 40° с.ш.) — (80° — 115° в.д.), ГА — (25° — 40° с.ш.) — (140° — 180° в.д.), ЛДД — (40° — 55° с.ш.) — (115° — 135° в.д.). Интенсивность ОЦ и ОА оценивалась по данным геопотенциала H_{500} и приземного давления над Охотским морем. Основными данными послужили архивы реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables) атмосферного давления P_0 , геопотенциала H_{500} в узлах регулярной сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ за период с 1950 по 2021 гг.

Результаты и обсуждение

В качестве примера на рис. 1. представлен временной ход аномалий температуры воздуха на станциях Усть-Хайрюзово и Рудная Пристань в марте и на станциях Курильск и Вадзима в августе 1950—2021 гг., которые расположены в разных климатических зонах. Для выделения крупных аномалий оценка σ рассчитывалась дважды: до 1980 г. и после него.

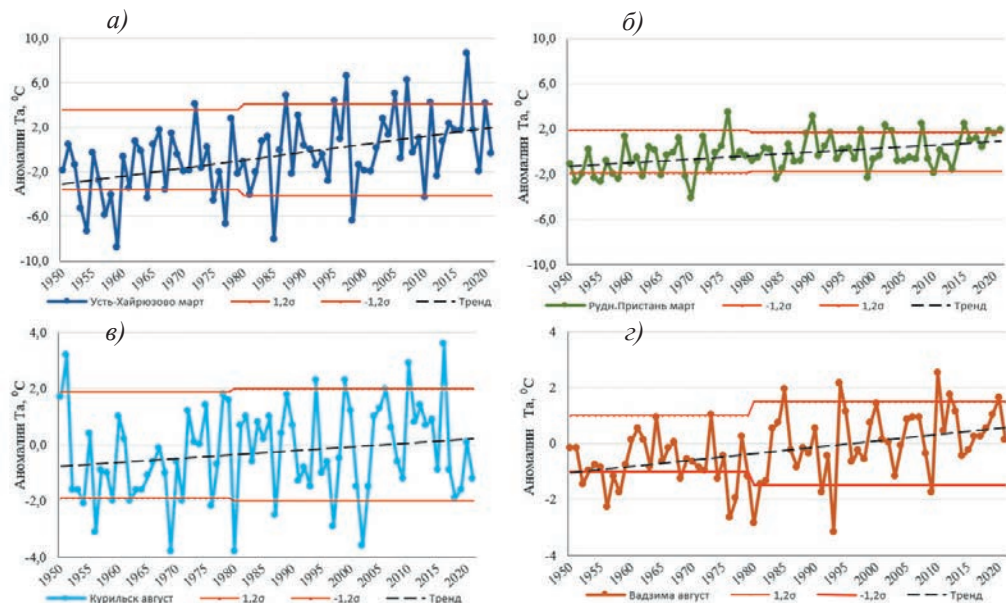


Рис. 1. Временные ряды аномалий среднемесячной температуры воздуха, в марте — на станциях Усть-Хайрюзово (а) и Рудная Пристань (б), в августе — на станциях Курильск (в) и Вадзима (г) 1950—2021 гг.

Пунктиром обозначены линии линейного тренда, красными линиями — границы крупных аномалий.

Fig. 1. Time series of anomalies of average monthly air temperature at Ust-Khairuzovo (a) and Rudnaya Pristan (b) stations in March, at Kurilsk (c) and Vajima (d) stations in August 1950—2021.

Dotted lines marc linear trends, in red are the boundaries of the major anomalies.

На станциях Усть-Хайрюзово и Рудная Пристань в 1980—2021 гг. наблюдается значительное количество крупных аномалий и обнаруживается, что они не только отличаются значениями, но и не совпадают по годам. Так, в марте на станции Рудная Пристань крупная положительная аномалия температуры воздуха отмечалась в 2015 г. (рис. 1 б), а на станции Усть-Хайрюзово она была в пределах нормы. Крупная аномалия на станции Усть-Хайрюзово отмечалась в 2017 г. (рис. 1 а), а на станции Рудная Пристань она была в пределах нормы. В августе также наблюдается несовпадение величин крупных аномалий на станциях, расположенных в различных климатических зонах (рис. 1 в, г). Несовпадение крупных аномалий означает, что их формирование имеет локальную природу. Линия линейного тренда во всех сезонах пролегает в границах крупных аномалий температуры воздуха (рис. 1 а — г).

В табл. 2 представлены значения крупных аномалий температуры воздуха для станций в 1950—1979 и 1980—2021 гг.

Таблица 2

Оценки максимальных аномалий температуры
среднемесячной температуры воздуха T_a °С для всех выбранных станций
Estimates of the maximum anomalies of mean monthly air temperature T_a °С for selected stations

Станция	Пе- риод	Аномалии температуры воздуха T_a , °С, по месяцам											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Охотск	1	3,9	3,2	2,5	1,6	1,2	1,6	1,2	0,9	1,1	1,9	3,0	3,4
	2	3,0	3,2	2,7	1,8	1,4	1,5	1,3	1,0	1,4	2,2	3,4	3,5
Поронайск	1	3,6	2,5	2,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,1	2,3	2,9
	2	3,2	3,1	2,3	1,1	1,2	1,5	1,6	1,5	0,9	1,3	2,5	3,0
Усть-Хайрю- зово	1	5,4	5,0	3,6	2,1	1,1	1,2	1,1	1,0	1,3	1,1	2,5	3,0
	2	3,9	4,0	4,1	2,7	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3	1,6	2,5	3,8
Курильск	1	1,7	2,4	1,6	1,3	1,4	1,5	2,3	1,9	1,4	1,0	1,2	1,6
	2	1,3	2,5	1,8	1,2	1,4	1,8	2,0	2,0	1,3	1,0	1,5	1,4
Абашири	1	1,6	2,3	1,4	1,5	1,8	1,4	2,3	2,0	1,2	1,0	1,5	1,9
	2	1,7	2,1	1,6	1,6	1,9	2,1	2,0	2,0	1,4	1,2	1,6	1,6
Сов. Гавань	1	3,3	2,3	2,1	1,3	1,4	1,1	1,2	1,4	1,0	1,1	2,3	2,7
	2	2,8	2,6	2,2	1,3	1,2	1,2	1,0	1,5	1,0	1,3	2,2	2,5
Рудная Пристань	1	2,5	2,3	1,9	0,8	1,3	1,4	1,5	1,5	1,0	1,2	2,0	2,6
	2	2,3	2,2	1,7	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,0	1,2	2,1	2,1
Углегорск	1	3,7	2,6	2,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,6	1,1	1,2	2,0	2,7
	2	2,6	2,6	2,0	1,1	1,4	1,2	1,2	1,4	1,1	1,4	2,0	2,2
Вадзима	1	1,3	1,4	1,2	1,1	0,7	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	0,9	1,5
	2	1,3	1,5	1,2	1,2	1,2	1,1	1,6	1,5	1,4	1,1	1,3	1,2

Примечание: период 1 — 1950 — 1979 гг., период 2 — 1980 — 2021 гг.

Наибольшие значения крупных положительных аномалий температуры воздуха отмечаются зимой на ГМС Охотск и Усть-Хайрюзово. На станции Курильск, Абашири, Рудная Пристань, Вадзима величины их значительно меньше. В летний период на станциях, расположенных в северной части Охотского моря, значения крупных аномалий уменьшаются. В летний сезон на станциях, расположенных в умеренных и южных районах, величина крупной положительной аномалии сравнима с холодным периодом.

Сравнительная оценка внутригодового хода числа лет с крупными положительными аномалиями температуры воздуха в периоды 1950—1979 и 1980—2021 гг. представлена на рис. 2.

Наблюдается явное различие числа лет с крупными аномалиями в 1950—1979 и 1980—2021 гг. Наибольшее количество крупных аномалий (8 лет) в 1980—2021 гг. отмечается в январе на станциях Охотск и Усть-Хайрюзово (рис. 2 а). В феврале наибольшее число отмечается только на станции Охотск (9 лет) (рис. 2 б). В марте число лет с крупными аномалиями увеличивается на станциях Абашири, Курильск, Рудная Пристань, и Вадзима (рис. 2 в). Наименьшее число крупных аномалий отмечается в апреле. В мае увеличивается только на станциях Поронайск, Советская Гавань, Рудная Пристань, Углегорск и Вадзима (рис. 2 в, г).

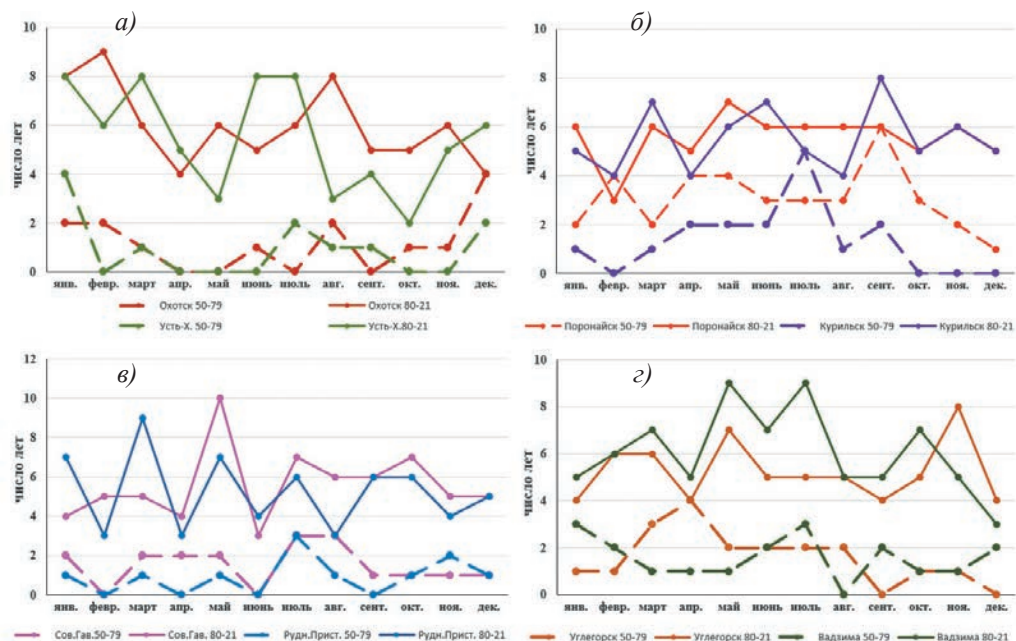


Рис. 2. Внутригодовой ход числа лет с крупными положительными аномалиями температуры воздуха в периоды 1950—1979 гг. и 1980—2021 гг.:

- а) Охотск и Усть-Хайрюзово, б) Поронайск и Курильск,
- в) Советская Гавань и Рудная Пристань, з) Углегорск и Вадзима.

Fig. 2. Intra-year course of the number of years with major positive air temperature anomalies in the periods 1950—1979 and 1980—2021:

- a) Okhotsk and Ust-Khairuzovo, b) Poronaysk and Kurilsk,
- c) Sovetskaya Gavan and Rudnaya Pier, d) Uglegor'sk and Vajima.

В июне наибольшее число лет с крупными аномалиями отмечается на станции Усть-Хайрюзово, Абашири, Курильск и Вадзима, в июле — на станции Усть-Хайрюзово и Вадзима, в августе — только в Охотске, в сентябре — в Курильске, в ноябре — только на станции Углегорск. Таким образом, для каждой станции наблюдаются сезонные различия в числе лет с крупными положительными аномалиями температуры воздуха.

Другой важной характеристикой временного ряда является частота появления крупных положительных аномалий. Эти данные приведены в табл. 3 также для двух периодов: 1950—1979 и 1980—2021 гг.

Расчеты показывают, что частота f появления крупных положительных аномалий в период 1980—2021 гг. заметно выше, чем в период 1950—1979 гг. Отсюда можно сделать вывод: хвост распределения аномалий в период 1980—2021 гг. тяжелее, чем хвост распределения аномалий в период 1950—1979 гг., хвост распределения аномалий в период 1980—2021 гг. является тяжелым.

Таблица 3

Оценки частоты появления крупных положительных аномалий
среднемесячной температуры воздуха в 1950—1979 и 1980—2021 гг.

Frequency of occurrence time series of major positive anomalies of air temperature
at the stations in 1950—1979 and 1980—2021

Периоды	Частота											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	Охотск											
1	0,07	0,07	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,07	0,00	0,03	0,03	0,13
2	0,19	0,21	0,14	0,10	0,14	0,12	0,14	0,19	0,12	0,12	0,14	0,10
	Поронайск											
1	0,07	0,13	0,07	0,13	0,13	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10	0,07	0,03
2	0,14	0,07	0,14	0,12	0,17	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,14	0,12
	Усть-Хайрюзово											
1	0,13	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,03	0,00	0,00	0,07
2	0,19	0,14	0,19	0,12	0,07	0,19	0,19	0,07	0,10	0,05	0,12	0,14
	Курильск											
1	0,03	0,00	0,03	0,07	0,07	0,07	0,17	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00
2	0,12	0,10	0,17	0,10	0,14	0,17	0,12	0,10	0,19	0,12	0,14	0,12
	Абашери											
1	0,00	0,00	0,03	0,10	0,10	0,07	0,13	0,07	0,03	0,00	0,00	0,07
2	0,10	0,12	0,17	0,12	0,14	0,17	0,12	0,12	0,12	0,14	0,10	0,12
	Сов.Гавань											
1	0,07	0,00	0,07	0,07	0,07	0,00	0,10	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03
2	0,10	0,12	0,12	0,10	0,24	0,07	0,17	0,14	0,14	0,17	0,12	0,12
	Рудная Пристань											
1	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,10	0,03	0,00	0,03	0,07	0,03
2	0,17	0,07	0,21	0,07	0,17	0,10	0,14	0,07	0,14	0,14	0,10	0,12
	Углегорск											
1	0,03	0,03	0,10	0,13	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,03	0,03	0,00
2	0,10	0,14	0,14	0,10	0,17	0,12	0,12	0,12	0,10	0,12	0,19	0,10
	Вадзима											
1	0,10	0,07	0,03	0,03	0,03	0,07	0,10	0,00	0,07	0,03	0,03	0,07
2	0,12	0,14	0,17	0,12	0,21	0,17	0,21	0,12	0,12	0,17	0,12	0,07

Примечание: период 1 — 1950—1979 гг., период 2 — 1980—2021 гг.

Понятие тяжелого хвоста распределения можно проиллюстрировать следующим образом. Например, хвост распределения Парето $1/t$, $t > 1$, существенно тяжелее хвоста распределения $\exp(-t)$. Это означает, что большие значения случайной величины с распределением Парето редкие, но не такие редкие, как у случайной величины с показательным распределением. Распределения с тяжелыми хвостами в последнее время активно используются в страховой математике при расчетах вероятности разорения страховой компании с большим начальным капиталом [11].

Наибольшая частота появления крупных положительных аномалий в период 1980—2021 гг. отмечается в Охотске в январе, феврале и в августе (табл. 3). На станции Усть-Хайрюзово — январе, марте, июне и июле. На станции Поронайск — в январе, марте, мае. На станции Курильск она отмечается в марте, июне и сентябре. На станции Советская Гавань максимальная частота наблюдается в мае, а на станции Рудная Пристань — в январе, марте и мае. На станции Углегорск максимальная частота отмечается в мае и ноябре, а на станции Вадзима — в мае и июле, т.е. частота экстремальных выбросов аномалий температуры воздуха для каждой станции существенно меняется в течение года.

Для более детального представления различий в частоте появления аномалий температуры приведены расчеты для двух одинаковых тридцатилетних периодов 1950—1979 и 1992—2021 гг.

Наибольшие различия в частоте появления аномалий в разные периоды на станции Охотск наблюдаются в феврале и августе, на станции Усть-Хайрюзово — в феврале и июле (рис. 3 а), на станции Вадзима — в марте и июле и на станции Советская Гавань — в апреле и октябре (рис. 3 б).

Таким образом, на станциях, расположенных в северной части Охотского моря, максимальная частота появления крупных положительных аномалий отмечается в январе и феврале. Практически для всех районов Охотского моря максимальное превышение критического уровня было в марте. На станциях, расположенных в прибрежных районах Японского моря, наибольшее превышение частоты критического уровня отмечается в мае.

Различия в изменчивости числа лет с крупными аномалиями и частоты появления крупных положительных аномалий температуры воздуха в периоды 1950—1979 и 1980—2021 гг. могут быть обусловлены особенностями атмосферной

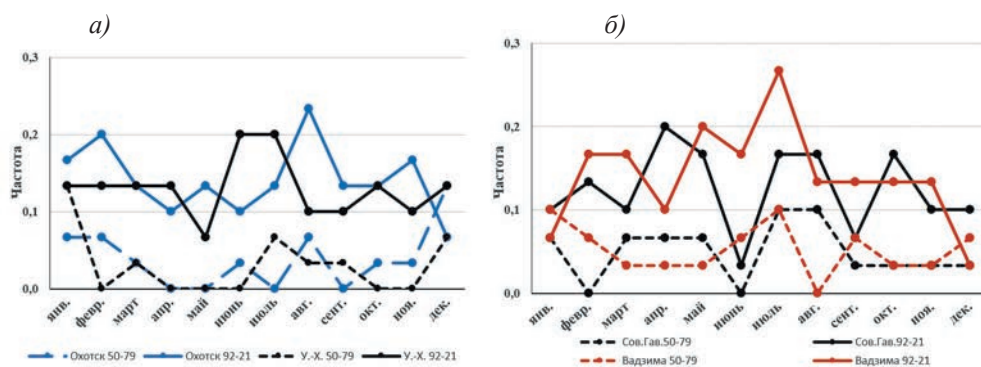


Рис. 3. Частота появления крупных положительных аномалий температуры воздуха в 1950—1979 и 1992—2021 гг.:

а) Охотск и Усть-Хайрюзово, б) Советская Гавань и Вадзима.

Fig. 3. Frequency of occurrence of large positive air temperature anomalies in the periods 1950—1979 and 1980—2021:

a) Okhotsk and Ust-Khairuzovo, b) Sovetskaya Gavan and Vajima.

циркуляции над вторым естественным синоптическим районом северного полушария (2 е.с.р.). В зимний период в район Охотского моря выходят активные циклоны, способствующие неустойчивости метеорологических параметров. В районах с высокой циклонической активностью увеличиваются флуктуации приземной температуры воздуха. В умеренных и южных районах в зимний сезон пролегает высотная фронтальная зона (ВФЗ). Колебания метеорологических параметров в этой зоне уменьшаются вследствие уменьшения активности циклонической деятельности.

Особенности атмосферной циркуляции в периоды 1950—1979 и 1980—2021 гг. представлены рядами аномалий среднемесячного приземного давления и геопотенциала H_{500} в центрах действия атмосферы (ЦДА) над Азиатско-Тихоокеанским регионом. В работе [12] была выявлена изменчивость режима тропосферной ложбины в период 1948—2017 гг. Было показано, что после 1980 г. увеличивается число лет с экстремально большими значениями геопотенциала H_{500} , а в марте над Охотским морем отмечался активный циклогенез.

В результате анализа многолетнего хода усредненных нормированных значений приземного давления и высоты изобарической поверхности 500 гПа в теплый период 1950—2021 гг. было выявлено, что после 1980 г. наблюдалось повышение давления в области азиатской депрессии и гавайского антициклона [10].

Многолетний ход интегральных характеристик атмосферы в период 1950—2021 гг. демонстрирует рис. 4. На этом рисунке представлены временные ряды аномалий приземного давления и геопотенциала H_{500} над Охотским морем (в области тропосферной ложбины) и северо-западной частью Тихого океана (в области ВФЗ) в марте и в августе в области охотского антициклона (ОА), летней дальневосточной депрессии (ЛДД), азиатской депрессии (АД) и северо-западном отроге гавайского антициклона (ГА).

В марте 1980—2021 гг. над Охотским морем (в области тропосферной ложбины) увеличивается число лет с активным циклогенезом, наблюдается отрицательный тренд по сравнению с предыдущим периодом (рис. 4 а). В отдельные годы отрицательные аномалии P_0 достигали минус 7—8 гПа. В северо-западной части Тихого океана (в области ВФЗ) циклоническая активность заметно ниже, а с 2010 г. отмечается рост приземного давления (рис. 4 б).

В июле и августе над Охотским морем циклоническая активность заметно уменьшается и увеличивается число лет с антициклонической циркуляцией.

Максимальное развитие антициклона над Охотским морем в августе отмечалось в 1980, 1987, 2002, 2015, 2019 и 2021 гг. (рис. 4 в). Над областью летней дальневосточной депрессии в период 1950—1979 гг. наблюдался рост приземного давления, однако значимого тренда в 1980—2021 гг. не выявлено.

Заметное отличие в тенденциях изменчивости в приземном поле и на изобарической поверхности AT_{500} гПа отмечается в области азиатской депрессии (рис. 4 д) и гавайского антициклона (рис. 4 е). Над ними наблюдается хорошо видимый положительный тренд, оба антициклона усиливаются.

Связь между температурой воздуха и циркуляцией атмосферы в зимний и летний период можно оценить коэффициентами корреляции между температурой

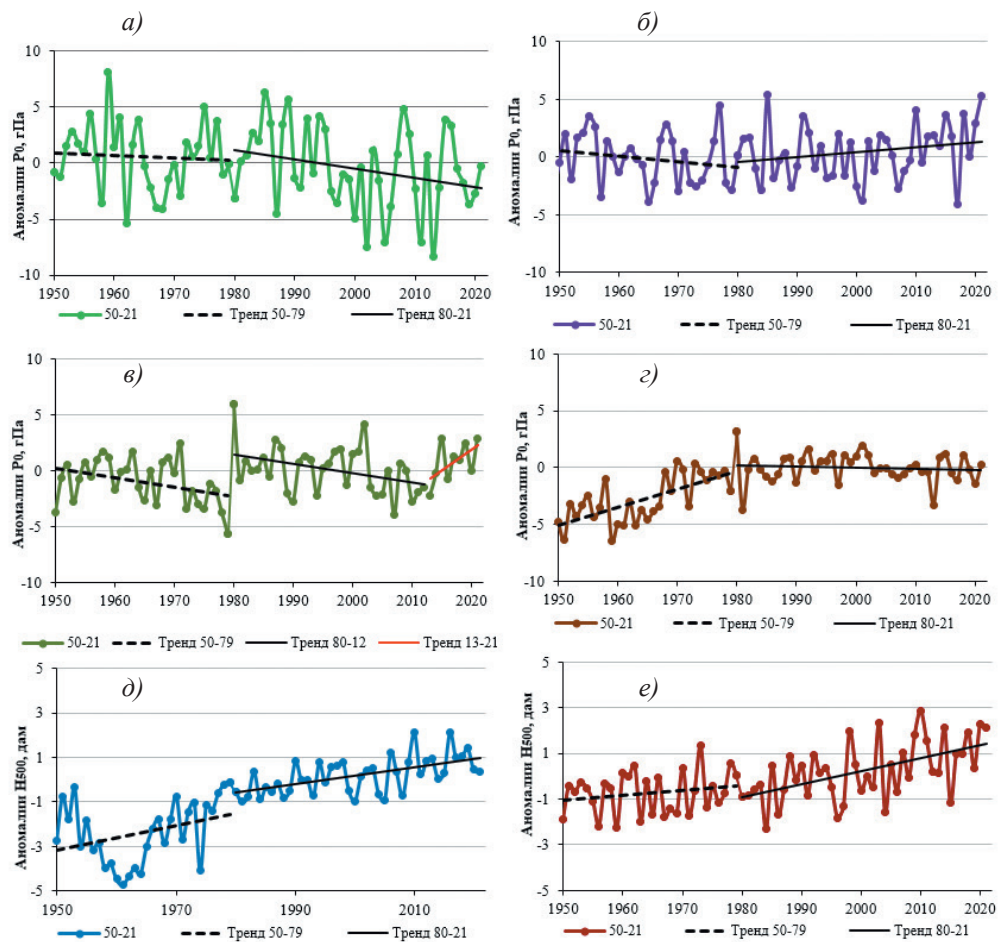


Рис. 4. Временные ряды аномалий в 1950—2021 гг.: аномалий среднемесячного приземного давления, в марте — над Охотским морем (а) и северо-западной частью Тихого океана (б), в августе — над Охотским морем (в) и летней дальневосточной депрессией (г); аномалий геопотенциала H_{500} в области азиатской депрессии (д) и гавайского антициклона (е).

Линейные тренды показаны для 1950—1979 и 1980—2021 гг., а также для августа 2013—2021 гг.

Fig. 4. Time series of anomalies in 1950—2021: average monthly surface pressure anomalies in March over the Sea of Okhotsk (a) and the Northwestern Pacific Ocean (b), in August over the Sea of Okhotsk (c) and the summer Far Eastern depression (d), H_{500} geopotential anomalies in the areas of the Asian depression (e) and the Hawaiian anticyclone (f).

Linear trends are shown for 1950—1979 and 1980—2021, as well as for August 2013—2021.

воздуха на ГМС Вадзима, Охотск, Советская Гавань, Усть-Хайрюзово и геопотенциалом H_{500} над областью высотной фронтальной зоны (ВФЗ) и областью тропосферной ложбины, располагающейся над Охотским морем (ТЛ) в 1950–1979 и 1992–2021 гг. Для этих лет была рассчитана частота f крупных аномалий (рис. 3).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между температурой воздуха на ГМС Вадзима, Охотск, Советская Гавань, Усть-Хайрюзово и геопотенциалом H_{500} над областью ВФЗ, ТЛ и частота (f) крупных аномалий температуры воздуха в январе и феврале 1950—1979 и 1992—2021 гг.

Correlation coefficients between the air temperature on GMS Vajima, Okhotsk, Soviet Havan, Ust-Khayruzovo and H_{500} over the VFZ, TL and frequency (f) of major air temperature anomalies in January and February 1950—1979 and 1992—2021

ГМС	1950—1979						1992—2021					
	Январь			Февраль			Январь			Февраль		
	ВФЗ	ТЛ	f	ВФЗ	ТЛ	f	ВФЗ	ТЛ	f	ВФЗ	ТЛ	f
Вадзима	0,63	-0,27	0,1	0,60	0,13	0,07	0,55	0,16	0,07	0,20	0,25	0,17
Охотск	-0,70	0,61	0,07	-0,42	0,65	0,07	-0,55	0,56	0,17	-0,55	0,54	0,2
Сов. Гав.	-0,52	0,60	0,07	-0,32	0,69	0,00	0,05	0,58	0,10	-0,43	0,78	0,13
У.-Хайр.	-0,58	0,63	0,13	-0,32	0,60	0,00	-0,37	0,27	0,13	-0,35	0,58	0,13

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции больших 0,5.

На станции Вадзима, которая располагается в южном районе, наибольшие коэффициенты корреляции температуры с геопотенциалом H_{500} отмечаются над областью ВФЗ, причем эта связь ослабляется во втором тридцатилетии. Особенно это заметно для февраля, когда увеличивается частота экстремальных выбросов, по сравнению с февралем предыдущего периода.

На ГМС Охотск, расположенной с северо-западной Охотского моря, (где обычно располагается охотский тропосферный циклон), наибольшая корреляция наблюдается в первом тридцатилетии, во втором тридцатилетии корреляция снижается при увеличении частоты f . В феврале первого периода наибольшие коэффициенты корреляции отмечаются над Охотским морем, во втором связь уменьшается с ТЛ, но увеличивается с ВФЗ. Заметим, что в этом месяце отмечается самая высокая частота крупных аномалий. На станции Советская Гавань наибольшая связь отмечается с тропосферной ложбиной. На станции Усть-Хайрюзово наблюдаются высокие коэффициенты корреляции с ВФЗ и ТЛ. Но заметно, что в январе 1992—2021 гг. данная связь ослабляется. Это связано с ослаблением интенсивности тропосферной ложбины, которое наблюдается с 1980 г. и увеличением частоты f [12].

Эти данные свидетельствуют о влиянии циркуляционных факторов на температуру воздуха в прибрежных районах Охотского и Японского морей. Для большинства станций уменьшение корреляционной связи между температурой воздуха и циркуляцией атмосферы во втором периоде наблюдается при росте частоты появления экстремальных выбросов.

В табл. 5 представлены коэффициенты корреляции между температурой воздуха на ГМС Вадзима, Охотск, Советская Гавань, Усть-Хайрюзово и приземным давлением P_0 над областью гавайского антициклона (ГА) и охотского антициклона (ОА) и частота появления экстремумов в июле и августе 1950—1979 и 1992—2021 гг.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между температурой воздуха на ГМС Вадзима, Охотск, Советская Гавань, Усть-Хайрюзово и приземным давлением P_0 над областью ГА и ОА и частота появления экстремумов в июле и августе 1950—1979 и 1992—2021 гг.

Correlation coefficients between the air temperature on GMS Vajima, Okhotsk, Soviet Havan, Ust-Khayruzovo and ground pressure P_0 over the region of GA and OA and the frequency of occurrence of extremums in July and August 1950—1979 and 1992—2021

ГМС	1950—1979						1992—2021					
	Июль			Август			Июль			Август		
	ГА	ОА	<i>f</i>	ГА	ОА	<i>f</i>	ГА	ОА	<i>f</i>	ГА	ОА	<i>f</i>
Вадзима	0,22	-0,50	0,10	0,25	-0,16	0,00	0,09	-0,36	0,27	0,13	-0,35	0,13
Охотск	0,25	-0,16	0,00	-0,11	0,11	0,07	0,46	0,01	0,13	0,04	-0,17	0,23
Сов.Гав.	0,32	-0,75	0,10	0,07	-0,44	0,10	-0,03	-0,22	0,17	0,12	-0,59	0,17
У.-Хайр.	0,02	-0,12	0,07	0,07	-0,07	0,03	-0,11	-0,19	0,2	-0,26	-0,29	0,10

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции больших 0,5.

В летнее время связь между температурой воздуха и ЦДА значительно уменьшается. Это связано с тем, что контраст между сушей и океаном ослабевает и число активных циклонов значительно уменьшается. Но здесь также прослеживается тенденция уменьшения коэффициентов корреляции с увеличением частоты. Это наблюдается в июле для станции Вадзима. На станции Охотск в июле повышается связь с ГА для второго периода, что согласуется с ростом давления в ГА (рис. 4 е).

На станции Советская Гавань в первый период в июле отмечалась большая связь с ОА, а в июле 1992—2021 гг. коэффициенты понизились при увеличении частоты появления экстремальных явлений. В августе 1992—2021 гг. увеличивается связь с ОА, что соответствует его росту (рис. 4 в).

На станции Усть-Хайрюзово во все периоды связь отсутствует.

Таким образом, можно полагать, что выявленные различия в числе крупных положительных аномалий и частоте их появления в значительной степени обусловлены изменениями циркуляционного режима в ЦДА.

В качестве конкретного примера механизма влияния циркуляции атмосферы на формирование крупных аномалий приземной температуры воздуха (рис. 5) представлены барические поля в марте 1998 г., когда на станциях Магадан и Усть-Хайрюзово аномалии температуры воздуха составили минус 4,4 °С и минус 6,6 °С, и в марте 2017 г., когда на станциях Магадан, Усть-Хайрюзово и Ича аномалии температуры воздуха достигали 8,5 °С [13]. На этом рисунке также представлены барические поля в августе 2002 г., когда на станциях о-ва Хоккайдо (Абашири, Немуро) и Курильске температура воздуха была ниже нормы

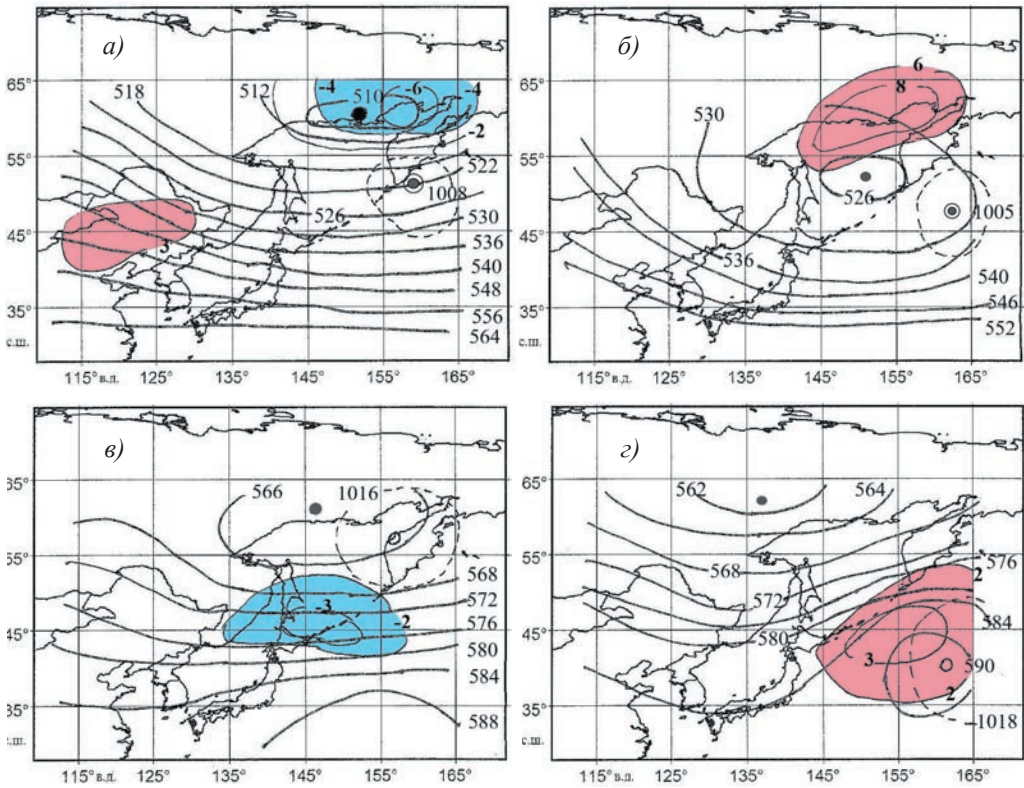


Рис. 5. Среднемесячная структура поля изобарической поверхности геопотенциала 500 гПа и положение экстремальных областей приземной температуры воздуха в марте 1998 г. (а) и 2017 г. (б), в августе 2002 г. (в) и 2016 г. (г).

Черным кружком обозначены центры депрессии, прозрачным кружком обозначены центры антициклонов, прозрачным кружком с черным центром обозначены центры приземных циклонов, голубым цветом выделены очаги с экстремально низкой температурой воздуха у земли, а розовым цветом — очаги с экстремально высокой температурой воздуха у земли.

Fig. 5. Average monthly field structure of 500 gP isobaric surface geopotential and the positions of surface air temperature extreme areas in March 1998 (a) and 2017 (b), in August 2002 (c) and 2016 (d).

The black circle denotes the depression centers, the transparent circle denotes the anticyclone centers, the transparent circle with the black center denotes the centers of ground-level cyclones, the blue color indicates the hotbeds with extremely low temperature near the ground, and pink — hot spots with extremely high air temperature near the ground.

на 2,9—3,6 °С и августе 2016 гг., когда аномалии температуры воздуха составляли на этих станциях 2,5 и 3,6 °С.

Нетрудно видеть, что крупные аномалии температуры воздуха, которые располагаются в небольших областях, имеют локальную природу. В марте 1998 г. экстремальное похолодание отмечалось в области депрессии, а циклоническая

активность отмечалась у юго-восточного побережья западной Камчатки (рис. 5 а). Экстремальное потепление над западной Камчаткой было обусловлено смещением центра депрессии в центральную часть Охотского моря, по восточной периферии циклонического вихря в северо-восточную часть Охотского моря поступали экстремально теплые воздушные массы. Циклоны были смещены в океаническую часть района (рис. 5 б).

В августе 2002 г. над северной частью Охотского моря располагалась депрессия, а в приземном поле антициклон, по его восточной периферии на район о-ва Хоккайдо и Южно-Курильском районе вторгались холодные воздушные массы (рис. 5 в). В августе 2016 г. район Камчатки оказался под воздействием гребня гавайского антициклона, что и явилось причиной появления очага крупных аномалий (рис. 5 г).

Выводы

Оценка внутрigoдового изменения числа лет и частоты появления крупных положительных аномалий температуры воздуха показала, что в период 1980—2021 гг. их было значительно больше, чем в период 1950—1979 гг.

На станциях, расположенных в северной части Охотского моря, максимальное число крупных положительных аномалий отмечается в январе и феврале. Практически для всех районов Охотского моря — в марте. На станциях, расположенных в прибрежных районах Японского моря, наибольшее превышение частоты критического уровня отмечается в мае.

Выявленные различия числа и частоты аномалий в периоды 1950—1979 гг. и 1980—2021 гг. определяются изменениями циркуляционного режима в центрах действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом.

В период 1980—2021 гг. резкий рост числа и частоты крупных аномалий приземной температуры воздуха совпадает с изменением режима тропосферной ложбины у восточного побережья Азии и продолжающимся усилением субтропических антициклонов (положительный тренд над их областями).

Рост числа крупных положительных аномалий температуры воздуха над Охотским морем в зимний период 1980—2021 гг. является причиной появления лет с аномально низкой ледовитостью, что было благоприятным климатическим фактором для ведения промысла минтая, являющегося одним из основных промысловых объектов Дальнего Востока.

Список литературы

1. Кикнев Д. Б., Круглова Е. Н., Куликова И. А., Муравьев А. В. Экстремальные метеорологические явления на сезонных и внутри сезонных интервалах времени в контексте изменения климата // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1 (379). С. 36—57. doi: <https://doi.org/10/37/162/2618-9631-2021-1-36-57>.
2. Каев А. М. Снижение численности горбуши (*oncorchus gorbucha*) в Сахалино-Курильском регионе как следствие действия экстремальных факторов среды // Изв. ТИНРО. 2018. Т.192. С. 3—14.
3. Лысенко А. В., Шатилина Т. А., Гайко Л. А. Влияние гидрометеорологических условий на динамику вылова (численности) приморской горбуши *Oncorhynchus gorbusha* (salmonidae) на основе

- ретроспективных данных (Японское море, Татарский пролив) // Вопросы ихтиологии. 2021. том 61. № 2. С. 206—218. doi: 10.31857/S0042875221020156.
4. Шунтов В. П., Темных О. С., Найденко С. В. Еще раз о факторах, лимитирующих численность тихоокеанских лососей (*Oncorhynchus* spp., сем. Salmonidae) в океанический период их жизни // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 3—22. doi: <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-196-3-22>.
 5. Кляшторин Л. Б., Любушин А. А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности // М.: Изд-во ВНИРО, 2005. — ISBN 5-85382-212-8, 235 с.
 6. Кровнин А. С., Кловач Н. В., Котенев Б. Н., Мурый Г. П. Связь уловов западно-камчатской горбуши и нерки с температурой поверхности океана в Северном полушарии и прогноз их вылова в 2010 г. // Рыб. хоз-во. 2010. №3. С. 43—46.
 7. Журавлева Т. М., Анжина Г. И. Долгосрочный прогноз аномалии температуры воздуха на весну по о. Сахалин с помощью статистической модели // Труды ДВНИГМИ. 2002. Вып. 150. С. 59—74.
 8. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм — ВМО. № 1203. Женева, 2017. 21 с.
 9. Спичкин В. А. Определение критерия крупной аномалии // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 15—20.
 10. Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В. Особенности изменчивости летних центров действия атмосферы над Дальним Востоком и климатические экстремумы в период 1980—2017 гг. // Ученые записки Российского государственного Гидрометеорологического университета. 2019. № 56. С. 61—80. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-61-80.
 11. Embrechts P., Klueppelberg C., Mikosch T. Modelling Extremal Events for Insurance and Finance: Stochastic Modelling and Applied Probability // Springer: Berlin, Germany. 1997. Volume 33. Ch. 1. pp. 3—19.
 12. Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В. Изменчивость режима тропосферной ложбины у восточного побережья Азии и климатические экстремумы в период 1980—2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 102—106.
 13. Бережная Т. В., Голубев А. Д., Паршина Л. Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в марте 2017 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 136—142.

References

1. Kiktev D. B., Kruglova E. N., Kulikova I. A., Murav'ev A. V. extreme meteorological phenomena on seasonal and intra-seasonal time intervals in the context of climate change *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecast*. 2021:1 (379): 36—57. doi: <https://doi.org/10/371162/2618-9631-2021-1-36-57>. (In Russ).
2. Kaev A. M. Reduction in the number of pink salmon (*Oncorhynchus gorbucha*) in the Sakhalin-Kuril region one as a consequence of the action of extreme environmental factors. *Izvestiya TINRO = Izv. TINRO*. 2018: (192): 3—14. (In Russ).
3. Lysenko A. V., Shatilina T. A., Gayko L. A. Effect of Hydrometeorological Conditions on Dynamics of Catches (Abundance) of the Primorye Pink Salmon *Oncorhynchus gorbusha* Based on Retrospective Data (Sea of Japan, Strait of Tartary). *Voprosy Ikhtiologii = Problems of Ichthyology*. 2021:61(2): 206—218. doi: 10.1134/S0032945221020119. (In Russ).
4. Shuntov, V. P., Temnykh, O. S., Naidenko, S. V. The limiting factors of abundance of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp., fam. Salmonidae) during ocean life period. *Izvestiya TINRO = Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr*. 2019:(196): 3—22. doi: <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-196-3-22>. (In Russ).
5. Klyashtorin L. B., Lyubushin A. A. *Tsiklicheskiye izmeneniya klimata i ryboproduktivnosti = Cyclic climate changes and fish productivity*. VNIRO Publishing: Moscow, Russia. 2005:235 p. (In Russ).
6. Krovnin A. S., Klovach N. V., Kotenev B. N., Mouriy G. P. The connection between of West Kamchatka pink (*Oncorhynchus gorbusha*) and sockeye (*O. nerka*) salmon catches and sea surface temperature of the ocean in the Northern Hemisphere. The approximate forecast of their catches for 2010. *Rybnoye Khozaystvo = Fisheries Journal*. 2010:(3): 43—46. (In Russ).
7. Zhuravleva T. M., Anzhina G. I. Long-term forecast of the air temperature anomaly for spring. *Trudy DVNIGMI = Proceedings of DVNIGMI*. 2002:(150): 59—74. (In Russ).

8. *Rukovodyashchie ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm. VMO.* 1203. Geneva. 2017:21 p. (In Russ).
9. Spichkin V. A. Determination of the criterion for a major anomaly. *Trudy AANII = Proceedings of AANII* 1987:(402): 15—20. (In Russ).
10. Shatilina T. A., Tsitsiashvili G. Sh., Radchenkova T. V. Features of the summer atmospheric force centers variability over the Far East and climatic extremes in the period 1980—2017. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of RGGMU.* 2019:(56): 61—80. doi: 10. 33933/ 2074-2762- 2019-56-61-80. (In Russ).
11. Embrechts P., Klueppelberg C., Mikosch T. *Modelling Extremal Events for Insurance and Finance: Stochastic Modelling and Applied Probability.* Springer: Berlin, Germany. 1997:(33)1: 3—19.
12. Shatilina T. A., Tsitsiashvili G. Sh., Radchenkova T. V. Variability of the regime of the tropospheric bins off the east coast of Asia and climatic extremes in the period 1980—2017. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology.* 2019:(8): 102—106. (In Russ).
13. Berezhnaya T. V., Golubev A. D., Parshina L. N. Anomalous hydrometeorological phenomena on the territory of the Russian Federation in March 2017 *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and hydrology* 2017:(6): 136—142. (In Russ)

Информация об авторах

Шатилина Татьяна Александровна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, ФГБНУ «ВНИРО», tatyana.shatilina@tinro-center.ru.

Цицашвили Гурам Шалвович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник ИПМ ДВО РАН, guram@iam.dvo.ru.

Радченкова Татьяна Вадимовна, инженер-исследователь, сотрудник ИПМ ДВО РАН, tarad@yandex.ru.

Information about authors

Shatilina Tatiana Aleksandrovna, Research institute of fisheries and oceanography, VNIRO, pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

Tsitsiashvili Guram Shalvovitch, Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia

Radchenkova Tatiana Vadimovna, Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.03.2023

Принята к печати после доработки 23.05.2023

The article was received on 01.03.2023

The article was accepted after revision on 23.05.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 277—292.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):277—292.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.535.3(282.247.441.82)
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-277-292

Прогнозирование расходов воды р. Мармарик (Армения) по уравнению кинематической волны

***Екатерина Владимировна Гайдукова¹, Вардуи Гургеновна Маргарян²,
Игорь Олегович Винокуров¹, Амалия Эдвардовна Мисакян³,
Марта Александровна Кулешова¹***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
Санкт-Петербург, Россия, oderiut@mail.ru

² Ереванский государственный университет (ЕГУ), Ереван, Армения

³ «Центр гидрометеорологии и мониторинга» ГНО, Министерство окружающей среды
Республики Армения, Ереван, Армения

Аннотация. В статье приведен обзор методов краткосрочного прогнозирования расходов воды на горных реках, основанных на физико-статистических и регрессионных уравнениях. Отмечаются требования к прогнозным моделям для армянских рек, которым соответствует модель кинематической волны. Произведена апробация этой модели на реке Мармарик, которая является важным водным объектом Армении. Выявлено, что антропогенное воздействие должно вводиться дополнительным параметром в модель. Получены удовлетворительные результаты поверочных краткосрочных прогнозов по модели кинематической волны.

Ключевые слова: горные реки, математическая модель, параметризация, прогнозы расходов воды, критерии оценки

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке КНРА (Комитет науки Республики Армения) и РЦНИ (Российский центр научной информации) в рамках совместной научной темы «Краткосрочный вероятностный прогноз стока рек в период весеннего половодья» № 20RF-039 и № 20-55-05006\20 соответственно.

Для цитирования: Гайдукова Е. В., Маргарян В. Г., Винокуров И. О., Мисакян А. Э., Кулешова М. А. Прогнозирование расходов воды р. Мармарик (Армения) по уравнению кинематической волны // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 277—292. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-277-292.

Original article

Forecasting water discharges of the river Marmarik (Armenia) according to the kinematic wave equation

*Ekaterina V. Gaidukova¹, Varduhi G. Margaryan²,
Igor O. Vinokurov¹, Amalia E. Misakyan³, Marta A. Kuleshova¹*

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia, oderiut@mail.ru

² Yerevan State University (YSU), Yerevan, Armenia

³ «Hydrometeorology and Monitoring Center» SNCO, Ministry of Environment of the Republic of Armenia, Yerevan, Armenia

Summary. The article provides an overview of methods for short-term forecasting of water flow in mountain rivers based on physical-statistical and regression equations, conceptual approaches. Requirements for forecast models for the Armenian rivers are noted, which correspond to the kinematic wave model, but so far there are no forecast results for the Armenian rivers using this model. The purpose of the study was to test a mathematical model of a kinematic wave for a short-term forecast of water discharges on the mountainous Armenian river Marmarik. The model of a kinematic wave can be obtained after simplifying the model of channel runoff in a general form, i.e., after excluding from consideration deformations, local constant and variable backwaters from narrowing of channels, confluence of rivers, surge phenomena, and also after excluding the influence of the lower boundary condition, which is responsible for the characteristic of the diffusion spreading of the flood wave.

A kinematic wave model was tested on the Marmarik River, which is an important water body in Armenia. We used series of observations of urgent water discharges during the spring flood from April 1 to June 30 for 2015—2018 at the top of the river Marmarik — Hankavan settlement, lower alignment — Aghavnadzor settlement and at the alignment on the main tributary of the river Gomraget — Meghradzor village. It was found that in the dynamic parametrization of the model, the anthropogenic impact should be introduced as an additional parameter. The obtained values of water discharges when making verification forecasts in the aggregate characterize the kinematic wave model as an effective approach according to the criteria for assessing the quality of forecast methods of the Hydrometeorological Center and Nash—Sutcliffe. The kinematic wave model is easy to use with a small amount of initial information without meteorological data, which will facilitate its implementation for practical applications.

Keywords: mountain rivers, mathematical model, parametrization, water discharges forecasts, evaluation criteria

Acknowledgments: The study was supported by SCRA (Science Committee of the Republic of Armenia) and RCNI (Russian Center for Scientific Information) within the framework of the joint scientific topic “Short-term probabilistic forecast of river flow during the spring flood” No. 20RF-039 and No. 20-55-05006\20, respectively.

For citation: Gaidukova E. V., Margaryan V. G., Vinokurov I. O., Misakyan A. E., Kuleshova M. A. Forecasting water discharges of the river Marmarik (Armenia) according to the kinematic wave equation. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):277—292. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-277-292.

Введение

На формирование стока горных и предгорных рек оказывают влияние особенности соответствующих водосборов, связанные с высотной поясностью,

свойствами подстилающей поверхности, возможным питанием рек водами ледников, поэтому при моделировании (прогнозировании) процессов стокообразования с горных водосборов с любой заблаговременностью должны учитываться перечисленные факторы.

При краткосрочных прогнозах расходов воды широко используются физико-статистические уравнения, которые рассчитываются по данным стокоформирующих факторов и их распределения по высоте гор и в пределах высотной зоны. Такой подход апробирован на р. Кубани и ее притоках, реках Ингури, Терек, реках Сибири и Средней Азии [1].

В Гидрометцентре России для рек Мзымта, Сочи, Западный Дагомыс, Куапсе, Туапсе и Вулан используется методика определения вероятности опасных наводнений в течение следующих суток в зависимости от гидрометеорологической информации на дату составления прогноза. Эта методика учитывает природные особенности региона и практически всю доступную гидрометеорологическую информацию по водосборам указанных рек и основывается на региональных моделях формирования талого и дождевого стока [2].

Также в Гидрометцентре России разработана прогнозная система для рек бассейна Кубани, вычислительной основой которой являются физико-статистические методы прогноза, учитывающие атмосферные процессы и гидрологическую обстановку в речной сети, а также концептуальная модель формирования тало-дождевого стока [3].

В последние годы в прогностических целях в гидрологических исследованиях все чаще используется спутниковая информация о снежном покрове. Например, в методике прогноза среднедекадного стока рек Варзоб и Тар (реки Центральной Азии, Республика Таджикистан и Киргизская Республика соответственно) учитывается индекс снежного покрова, который рассчитывается по данным спутниковых снимков для высотных зон с шагом 200 м [4].

Практическое распространение получили также модели, основанные на регрессионных уравнениях. Например, для прогноза уровня воды реки Мзымта (Краснодарский край) предложены методики, основанные на регрессионном анализе и нейросетевых технологиях [5], а также теории Марковских процессов с дискретным временем [6]. Использование множественной регрессии с двумя предикторами (расходом воды за предшествующий период и осадками) привело к улучшению прогнозов на реке Нарым (река в Восточно-Казахстанской области Казахстана, правый приток Иртыша) [7]. Для реки Амыл (горная река Красноярского края) сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней воды показал, что однофакторные зависимости имеют более высокие коэффициенты детерминации, чем модель множественной регрессии [8].

Правительством Армении [9] обозначены пожелания к методикам прогноза расходов воды рек Республики, которые должны основываться на доступных исходных данных, учитывать процесс формирования стока на горных водосборах и иметь возможности для развития. К таким подходам можно отнести модель кинематической волны, которая имеет широкую апробацию и высокую эффективность применения на реках всего мира, см. например, [10, 11, 12]. Но результаты

прогноза по этой модели на реках Армении отсутствуют. В настоящее время для армянских рек относительно успешно применяются регрессионные модели, которые имеют локальное применение, требуют значительный массив исходной информации и зачастую являются неэффективными при прогнозах катастрофических явлений на горных реках (см., например, [13]).

Цель исследования заключается в апробации математической модели кинематической волны для краткосрочного прогноза расходов воды на армянской реке Мармарик, бассейн которой является стратегически важным объектом с точки зрения содержащихся в реке водных запасов для использования их в сельскохозяйственном и энергетическом секторах [14]. К тому же долина р. Мармарик имеет большие рекреационные возможности, в ее долине находится месторождение минеральной воды «Анкаван» [15, 16].

Модель кинематической волны

Модель руслового стока в общем виде имеет следующий вид:

$$\begin{cases} -\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U^2}{C^2 h}; \\ b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q; \\ b \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = q_1, \end{cases} \quad (1)$$

где z — отметка дна; h — глубина; g — ускорение свободного падения; U — скорость потока; C — коэффициент Шези; b — ширина потока; Q — расход воды; G — расход наносов; q, q_1 — приток воды и наносов на участке реки; t — время; x — координата.

Первое уравнение системы — гидродинамическое уравнение равновесия, второе уравнение системы описывает закон сохранения массы воды, третье уравнение — закон сохранения количества наносов. Так как приведенная система незамкнутая, то необходимо четвертое уравнение для учета расходов наносов $G = f(h, U)$.

Чтобы решить систему уравнений (1), необходимо найти $h = f(x, t)$, $z = f(x, t)$, $U = f(x, t)$, что позволит давать прогноз водного режима и русловых деформаций. Кроме того, следует задать начальные и граничные условия.

В практике прогнозов используют упрощенные варианты общей модели руслового стока (1). При исключении деформаций не рассматривается изменение отметок дна, перемещение по длине русла твердых частиц. В системе (1) остаются два первых уравнения — это система Сен-Венана, которую можно использовать:

- если ложе русла устойчиво к деформациям;
- если деформации есть, но их скорость очень мала по сравнению со скоростью воды (изменение уровня воды происходит, в основном, только за счет наполнения русла водой);

— если деформации есть, но их прогноз, т.е. режим движения наносов и изменение отметок дна практически не важен (при прогнозах деформация рассматривается как некий мешающий процесс, который можно учесть через параметры уравнения).

При исключении локальных постоянных и переменных подпоров от сужений русел, впадения рек, сгонно-нагонных явлений игнорируется сила инерции, т.е. предполагается, что режим движения установившийся и равномерный. Система (1) сводится к уравнению диффузионной волны, содержащему диффузионный член, отвечающий за распластывание волны.

Пренебрегая диффузионным членом, получена модель кинематической волны:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = c(Q)q, \quad (2)$$

где $c(Q)$ — скорость перемещения паводочной волны; q — величина притока на участке реки.

Чтобы решить уравнение (2), надо найти изменение расхода воды по времени и по координате (по расстоянию). При этом следует учитывать заданные граничные условия $Q_b = f(t)$, $t \in [t, t + \tau]$ и начальные условия $Q(t = 0) = Q(x)$, $x \in [x_b, x_n]$ (здесь Q_b — расход воды в верхнем створе; τ — время заблаговременности; x_b , x_n — координаты верхнего и нижнего створов).

Исходные данные

Река Мармарик (рис. 1) является основным и самым многоводным притоком р. Раздан. Длина реки составляет 37 км, площадь водосборного бассейна — 427 км², средняя высота бассейна — 2300 м, отметки истока и устья — 2520 и 1699 м соответственно. Средний уклон речного бассейна — 22 %. Питание реки снего-дождевое (74,8 %) и подземное (25,2 %) [17], половодье наблюдается весной и в начале лета — на этот период приходится 65—80 % годового стока.

Река течет в основном по направлению с северо-запада на юго-восток, русло выделяется извилистостью, в частности в верхнем течении. Рельеф бассейна р. Мармарик типично горный — он сильно расчленен долинами, оврагами и водотоками. С орографической точки зрения он находится в области Северо-Восточных складчато-глыбовых гор [18]. Гидрогеологические условия бассейна р. Мармарик неблагоприятны для инфильтрации поверхностных вод, и для него не характерно значительное накопление подземных вод.

В бассейне р. Мармарик гидрологические и метеорологические исследования проводились, начиная с 30-х годов XX века. Их результаты в виде книжек наблюдений и рабочих таблиц хранятся в гидрометеорологическом фонде Армгидромета.

В период 1930—2022 гг. в бассейне р. Мармарик в общей сложности действовало девять гидрометрических наблюдательных постов, из которых только один

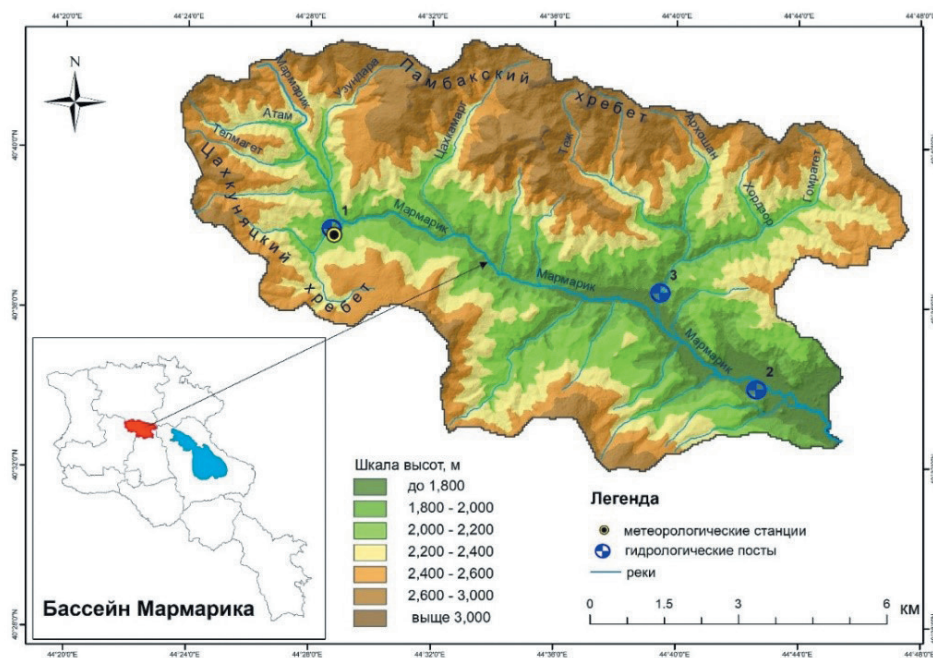


Рис. 1. Сеть метеорологических станций и гидрологических постов в бассейне р. Мармарик.

Гидрологические посты: 1 — р. Мармарик — п. Анкаван; 2 — р. Мармарик — п. Агавнадзор; 3 — р. Гомрагет — п. Меградзор. Метеорологическая станция: 1 — Анкаван [19].

Fig. 1. Network of meteorological stations and hydrological posts in the basin of the river. Marmarik.

Hydrological posts: 1 — r. Marmarik — Hankavan village; 2 — r. Marmarik — v. Aghavnadzor; 3 — r. Gomraget — village of Meghradzor. Meteorological station: 1 — Hankavan [19].

функционировал до 1958 г., а три — с 1958 до 1960 гг. Сравнительно длинный ряд наблюдений имеют четыре гидрометрических наблюдательных поста (р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Улашик — п. Артаваз, р. Гомрагет — п. Меградзор), а с 1 июня 1988 г. не действует также пост Артаваз на р. Улашик. В настоящее время в бассейне действуют только три наблюдательных поста, информация по которым и была использована для достижения цели исследования. Карта бассейна р. Мармарик представлена на рис. 1, основные характеристики подбассейнов показаны в табл. 1.

Результаты исследования

Модель кинематической волны апробировалась на рядах расходов воды весеннего половодья. Период исследования составлял с 1 апреля 2015 г. по 30 июня по 2018 г.

Таблица 1

Основные гидрометрические характеристики водосборов рек
до гидрометрических створов

Main hydrometric characteristics of river catchment areas up to hydrometric sites

Река — пост 1—3 — номера постов на рис. 1	Расстояние, км		Уклон реки, ‰				высота нуля графика, м БС	Основные характеристики водосбора			
	от устья	от истока	средний		средневзвешенный			пло- щадь, км ²	средняя высота, м	сред- ний уклон, ‰	леси- стость, %
			от удален- ной точки	от истока	от удален- ной точки	от истока					
1. Мармарик — Анкаван	30	7,4	86	77	72	70	1949,66	91,3	2430	316	6
2. Мармарик — Агавнадзор	8,0	29	37	27	22	16	1726,00	385	2350	338	13
3. Гомрагет — Меградзор	2,6	12	87	58	78	51	1764,18	101	2430	339	4

Хронологические графики среднесуточных расходов воды верхнего створа р. Мармарик — п. Анкаван, нижнего створа р. Мармарик — п. Агавнадзор и створа на главном притоке р. Гомрагет — п. Меградзор за 2015 год показаны на рис. 2. Видно, что пики на верхнем створе совпадают с пиками изменения расходов воды на нижнем створе, время добегания на рассматриваемом участке меньше суток, соответственно, заблаговременность прогноза тоже должна быть меньше суток.

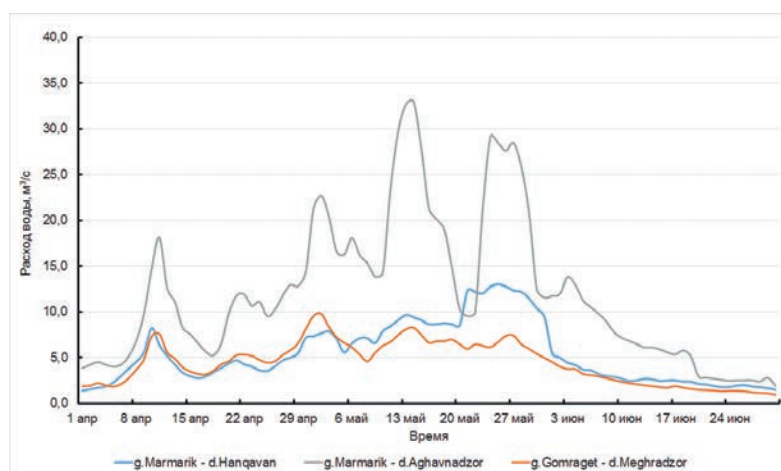


Рис. 2. Хронологические графики среднесуточных расходов воды р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Гомрагет — п. Меградзор.

Fig. 2. Chronological graphs of the average daily water consumption of the river. Marmarik — Hankavan village, r. Marmarik — Aghavnadzor village, r. Gomraget — village of Meghradzor.

ГНКО «Центр гидрометеорологии и мониторинга» Министерства окружающей среды Республики Армения предоставил информацию об измеренных срочных расходах воды. Графики изменения расходов воды, измеренных в 8 часов и в 20 часов, с 1 апреля по 30 июня показаны на рис. 3. Гидрографы имеют более изрезанный вид по сравнению графиком для среднесуточных значений, но появилось время добегания паводочных волн в пределах 12 часов.

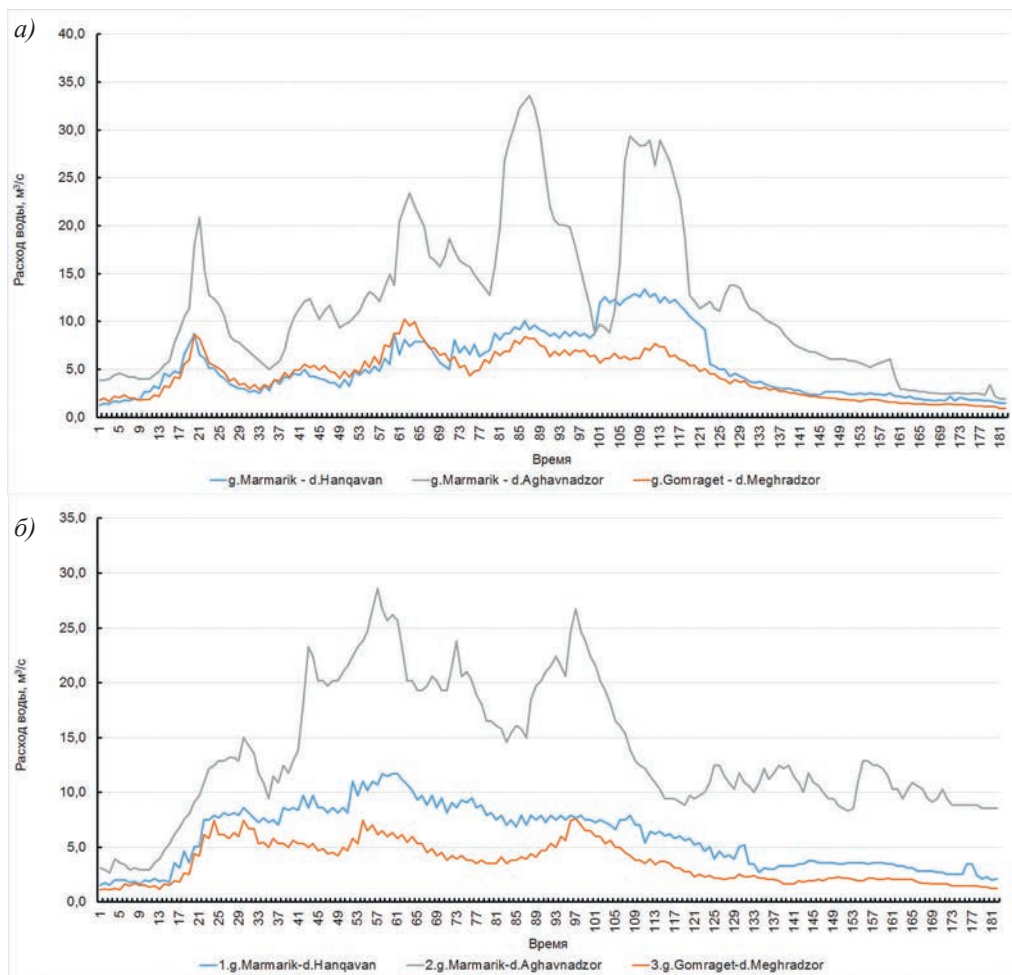


Рис. 3 (начало). Хронологические графики срочных расходов воды р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Гомрагет — п. Меградрзор: а) 2015, б) 2016 годы.

Fig. 3. Chronological charts of urgent water flow of the river. Marmarik — Hankavan settlement, r. Marmarik — Aghavnadzor village, r. Gomraget — Meghradzor village: c) 2017, d) 2018.

При использовании модели кинематической волны необходима параметризация величин скорости передвижения паводочной волны и притока в русло на рассматриваемом участке реки. Известны линейные размеры русла и значение главного притока на участке от верхнего до нижнего створа (река Гомрагет), которые

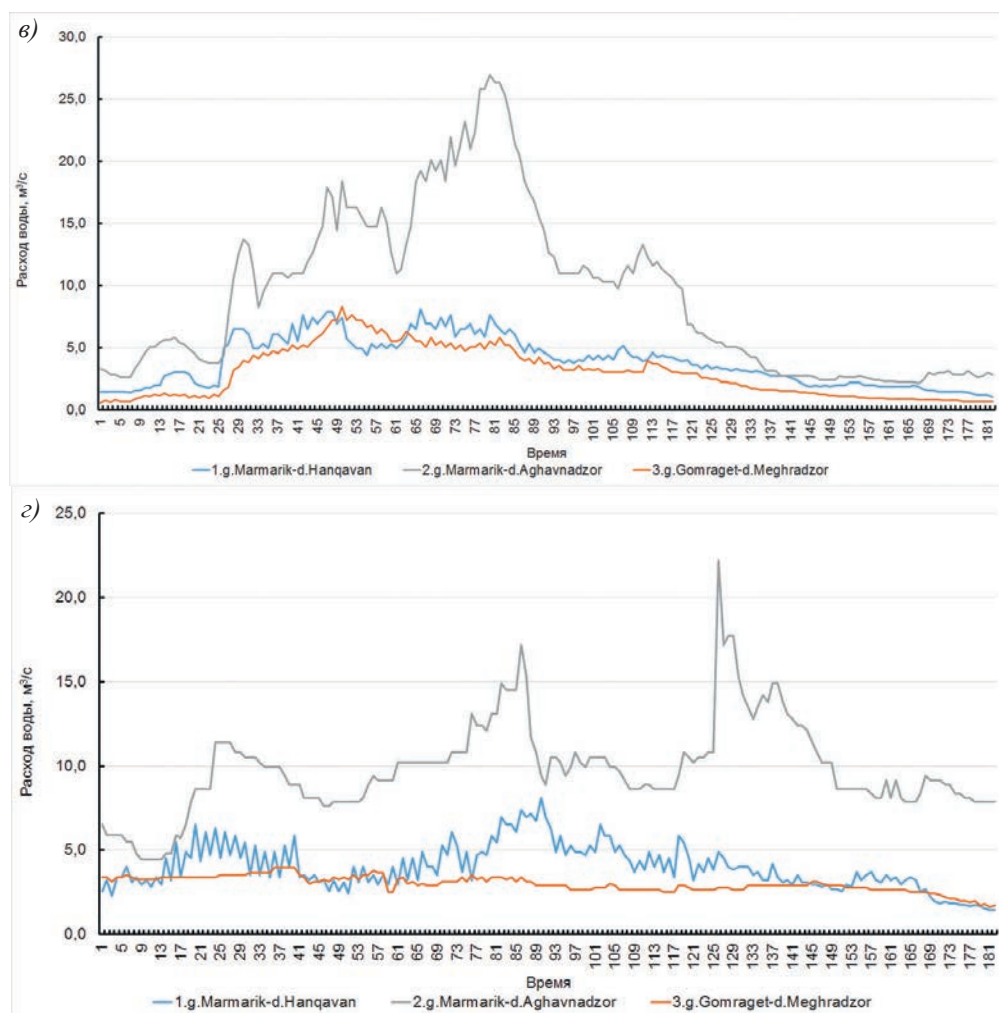


Рис. 3 (окончание). Хронологические графики срочных расходов воды
 р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Гомрагет — п. Меградзор:
 б) 2017, в) 2018 годы.

Fig. 3. Chronological charts of urgent water flow of the river. Marmarik — Hankavan
 settlement, r. Marmarik — Aghavnadzor village, r. Gomraget — Meghradzor village:
 б) 2017, в) 2018.

являются ориентировочными при параметризации модели для прогноза с заблаговременностью 12 часов.

Модель кинематической волны решалась численным методом, в основе которого конечно-разностная аппроксимация и явная схема с разностью «вперед» [20]. Применялась динамическая параметризация, т.е. параметризация модели производилась по предшествующим дате выпуска прогноза пятнадцати значениям, соответствующим 8-часовым и 20-часовым измерениям за сутки, а период параметризации сдвигался к сроку выпуска прогноза. Поверочные прогнозы оценивались по двум критериям (метод ГМЦ и ГГИ): соотношению среднеквадратической погрешности к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины за период заблаговременности (S/σ_{Δ}) и числу оправдавшихся прогнозов (P , %). За оптимальные значения параметров принимаются те значения, с которыми при поверочном прогнозе получены минимальное соотношение S/σ_{Δ} и максимальная величина P .

Следует отметить, что при прохождении наибольшего объема паводочных вод наблюдается антропогенное влияние, выражающееся в отсутствии соответствия характерных точек гидрографов верхнего и нижнего створов, которое учитывалось в модели еще одним параметром совместно с величиной притока на участке реки q . Значение этого параметра оптимизировалось только на предыдущем шаге от даты выпуска прогноза и предполагалось, что за период заблаговременности это влияние останется неизменным.

На рис. 4 показаны фактические и прогнозные гидрографы в створе п. Агавнадзор (р. Мармарик) за рассматриваемые годы.

Несмотря на относительную схожесть, с небольшими различиями, фактических и прогнозных гидрографов, критерии оценки эффективности прогностических подходов (методы ГМЦ (S/σ_{Δ}) и ГГИ (P)) показывают пограничные значения, но все же относящиеся метод к категории удовлетворительных. Исключение составляют 2018 год и показатели критерия Нэша—Сатклиффа (NSE), которые подтверждают эффективность метода кинематической волны для моделирования стокагорной реки Мармарик. Численные значения критериев оценки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения критериев оценки эффективности прогностического подхода
Numerical values of the criteria for evaluating the effectiveness of the prognostic approach

Год	Критерий		
	S/σ_{Δ}	P , %	NSE
2015	0,79	74	0,96
2016	0,84	59	0,95
2017	0,78	70	0,97
2018	0,64	79	0,89

Поверочные прогнозы выполнялись по достаточно длинному ряду расходов воды. При этом происходило накопление погрешности прогнозов при малых

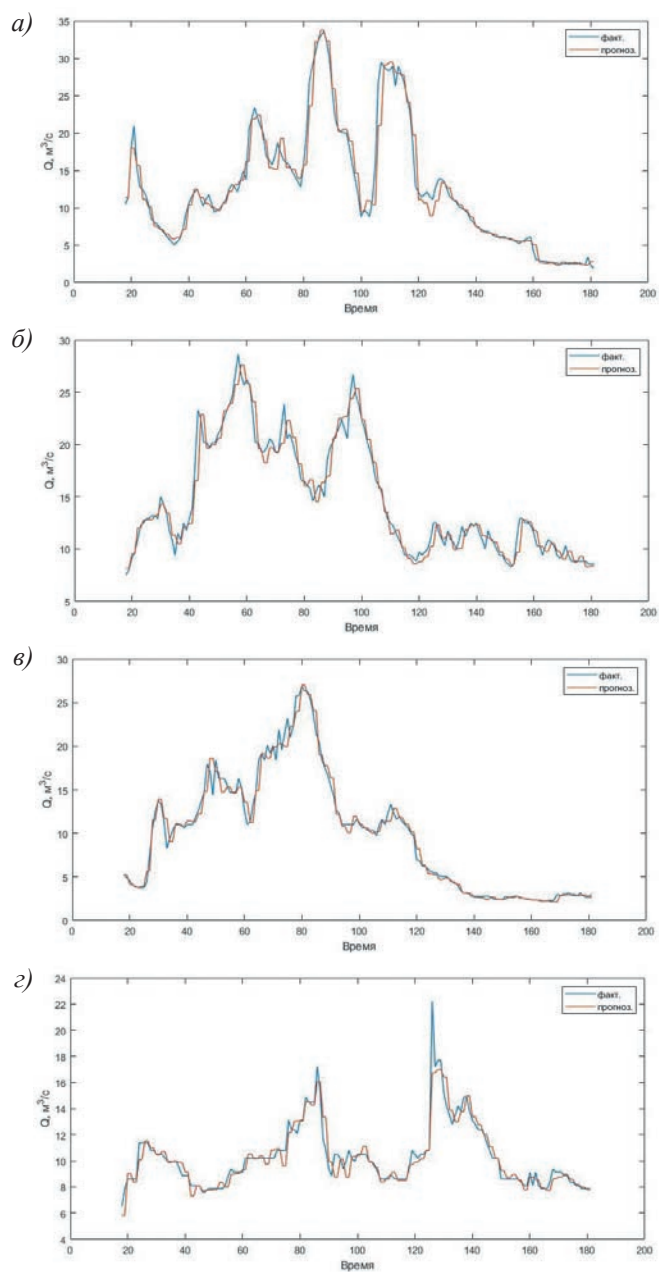


Рис. 4. Фактический и прогнозный гидрограф р. Мармарик — п. Агавнадзор:

а) 2015, б) 2016, в) 2017, г) 2018 годы.

Fig. 4. Actual and forecast hydrograph of the river. Marmarik — Aghavnadzor settlement:

a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

междусрочных изменениях речного стока, что привело к завышенным оценкам критерия ГМЦ. Критерий *NSE* соотносит погрешности прогнозов со среднеквадратическим отклонением от среднего значения фактической величины расхода воды, получаются гораздо большие значения, чем при оценке среднеквадратических отклонений изменений фактической величины за период заблаговременности (σ_{Δ}). В таком случае критерий *NSE* можно отнести к «мягким» методам оценки эффективности прогностических подходов.

Неудовлетворительные результаты получены за 2016 г. Наблюдаются несоответствия максимальных значений по времени, что может быть связано с относительно более быстрой скоростью процесса в указанный год, т.е. время добега было меньше 12 часов. Наилучшие результаты получены за 2018 г., хотя максимальное значение не удалось спрогнозировать методом кинематической волны.

К общим недостаткам рассмотренной модели можно отнести невозможность прогнозировать трансформацию паводочной волны при движении по руслу, поскольку она не заложена в модели. Поскольку для горных рек характерны устойчивые и малоизменяющиеся формы русел в верхнем и нижнем створах, а также относительно быстрые течения из-за уклона и отсутствие развитой поймы, недоучет трансформации паводочной волны не вносит существенной погрешности в прогнозные значения. К недостаткам также можно отнести малую заблаговременность прогноза, но при катастрофических явлениях даже малая заблаговременность при эффективном прогностическом методе позволит избежать больших потерь и жертв в бассейне нижнего течения р. Мармарик, который отличается урбанизированностью территорий.

К положительным сторонам метода относится независимость от прогнозной метеорологической информации, которая может добавлять существенные погрешности в расчетные составляющие, относительная простота метода и малый объем исходной информации.

Выводы

В исследовании выполнена апробация использования модели кинематической волны к стоку горной реки Мармарик. Получены следующие результаты:

— модель кинематической волны является простой, использующей относительно небольшой объем информации, что облегчает возможность внедрения в практику;

— время добега паводочной волны от верхнего створа до нижнего рассматриваемого участка на р. Мармарик составляет 12 часов, соответственно заблаговременность прогноза соответствует этому временному интервалу;

— динамическая параметризация параметров модели кинематической волны дает удовлетворительные результаты;

— антропогенное воздействие (изъятие вод на орошение и водоснабжение промышленных предприятий) должно вводиться дополнительным параметром в модель совместно с величиной притока на рассматриваемом участке реки;

— полученные значения расходов воды при проведении поверочных прогнозов в совокупности характеризуют модель кинематической волны как эффективный подход по критериям оценки качества прогнозных методик ГМЦ и Нэша—Сатклиффа.

Дальнейшие исследования предполагают апробацию модели кинематической волны на армянской р. Дебед, которая отличается наличием многочисленных притоков и существенной водохозяйственной нагрузкой.

Список литературы

1. Мухин В. М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 5—46.
2. Христофоров А. В., Юмина Н. М., Белякова П. А. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 50—57.
3. Борщ С. В., Симонов Ю. А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 63—87.
4. Ниязов Дж. Б., Калашникова О. Ю., Гафуров А. А. Методика прогноза водности высокогорных рек Центральной Азии на основе снимков MODIS // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. 2020. Т. 6. № 2-2. С. 26—37. doi: 10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-2/26-37.rus.
5. Семенчин Е. А., Титов Н. Г., Кузякина М. В., Лебедев К. А. Сравнительный анализ методов математического моделирования уровня воды в реке горного типа (на примере реки Мзымта) // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-5. С. 952—957.
6. Титов Н. Г., Кузякина М. В., Лебедев К. А. Применение равенства Маркова для прогнозирования уровня воды в реке с крутым падением водотока // Научный альманах. 2015. № 9(11). С. 1126—1129. doi: 10.17117/na.2015.09.1126.
7. Карамолдоев Ж. Ж., Калашникова О. Ю. Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период // Бишкек: Вестник БГУ. 2012. № 3 (23). С. 146—150.
8. Галахов В. П., Ловцкая О. В., Самойлова С. Ю., Мардасова Е. В. Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней и объема стока периода половодья горной реки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринггеоресурсов. 2022. Т. 333. № 2. С. 193—203. doi: 10.18799/24131830/2022/2/3438.
9. Modernizing Weather, Climate and Hydrological Services: A Road Map for Armenia // Government of Armenia and the World Bank Group, 2018 Режим доступа: https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Hydrometeorological%20Report%20Armenia_September2018_Final.pdf (дата обращения 21.11.2022).
10. Motovilov Y. G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Institute Report Series No: 105 ISBN 82-91885-04-4. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. Режим доступа: <https://studylib.net/doc/> (дата обращения 25.11.2022).
11. Tung-Lin Tsai, Jinn-Chuang Yang. Kinematic wave modeling of overland flow using characteristics method with cubic-spline interpolation // Advances in Water Resources, 28, 2005, 661—670 doi:10.1016/j.advwatres.2005.01.005
12. Крутов А. Н., Школьников С. Я. Уравнения кинематической волны для размываемых русел // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 43—54. doi: 10.52002/0130-2906-2021-6-43-54.
13. Маргарян В. Г., Гайдукова Е. В., Азизян Л. В., Хаустов В. А. О прогнозе максимальных расходов весеннего половодья реки Арпа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 3. С. 75—87. doi: 10.35567/19994508_2022_3_6.
14. National Adaptation Plan to Advance Medium and Long-Term Adaptation Planning in Armenia Project “Development of Water Sector Adaptation plan in Armenia” // UNDP/GCF, Ministry of the Environment

- of Armenia, 2021. Режим доступа: http://www.nature-ic.am/Content/announcements/12796/WSAP_draft_report_eng.pdf (дата обращения 27.11.2022).
15. Маргарян В. Г. К оценке многолетних колебаний максимального стока реки Мармарик // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 22—31. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-22-31.
 16. Маргарян В. Г. Прогноз максимального стока реки Мармарик и оценка его реакции на глобальное изменение климата (Армения) // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 35—45. doi: 10.17223/25421379/13/4.
 17. Гидрография Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1981. 177 с. (на армянском яз.).
 18. Физическая география Армянской ССР. Ереван: изд-во АН Арм. ССР, 1971. 470 с. (на армянском яз.).
 19. Маргарян В. Г., Гайдукова Е. В., Седракян А. М., Винокуров И. О. Оценка особенности распределения максимального стока весенних половодий в современных условиях изменения климата в бассейне реки Мармарик // Ученые записки ЕГУ. Геология и география. 2022. № 56(2). С. 102—113. <https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2022.56.2.102>.
 20. Гайдукова Е. В., Викторова Н. В. Численные методы в гидрологии. СПб.: изд-во РГГМУ, 2019. 112 с.

References

1. Mukhin V. M. Methodical foundations of physical and statistical types of short-term forecasts of mountain river runoff. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Federatsii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2013; (349): 5—46. (In Russ.).
2. Khristoforov A. V., Yumina N. M., Belyakova P. A. Forecast of the flood runoff of the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus with a lead time of one day. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. = Bulletin of the Moscow University. Series 5: Geography*. 2015; (3): 50—57. (In Russ.).
3. Borshch S. V., Simonov Yu. A. Operational system of short-term hydrological forecasts of water flow on the rivers of the Kuban basin. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Federatsii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2013; (349): 63—87. (In Russ.).
4. Niyazov J.B., Kalashnikova O. Yu., Gafurov A. A. Methodology for predicting the water content of high-mountain rivers in Central Asia based on MODIS images. *Tsentral'noaziatskiy zhurnal vodnykh issledovaniy = Central Asian Journal of Water Resources Research*. 2020; 6 (2-2): 26—37. (In Russ.). doi: 10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-2/26-37.rus.
5. Semenchin E. A., Titov N. G., Kuzyakina M. V., Lebedev K. A. Comparative analysis of methods of mathematical modeling of the water level in a mountain-type river (on the example of the Mzymta River). *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental Research*. 2014; (12—5): 952—957. (In Russ.).
6. Titov N. G., Kuzyakina M. V., and Lebedev K. A. Application of the Markov Equation for Predicting the Water Level in a River with a Steep Dip. *Nauchnyy al'manakh = Nauchny Almanakh*. 2015; 9(11): 1126—1129. (In Russ.). doi: 10.17117/na.2015.09.1126.
7. Karamoldoev Zh. Zh., Kalashnikova O. Yu. Forecast of water inflow into the Toktogul reservoir for the growing season. *Bishkek: Vestnik BGU = Bishkek: Bulletin of BSU*. 2012; 3 (23): 146—150. (In Russ.).
8. Galakhov V. P., Lovtskaya O. V., Samoilova S. Yu., Mardasova E. V. Comparative analysis of methods for predicting the maximum levels and volume of runoff during the high water period of a mountain river. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2022; 333 (2): 193—203. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2022/2/3438.
9. Modernizing Weather, Climate and Hydrological Services: A Road Map for Armenia // Government of Armenia and the World Bank Group, 2018. Available at: https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Hydrometeorological%20Report%20Armenia_September2018_Final.pdf (accessed on: 21.11.2022).
10. Motovilov Y. G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Institute Report Series No: 105 ISBN 82-91885-04-4.

- Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. Available at: <https://studylib.net/doc/> (accessed on: 25.11.2022).
11. Tung-Lin Tsai, Jinn-Chuang Yang. Kinematic wave modeling of overland flow using characteristics method with cubic-spline interpolation. *Advances in Water Resources*. 2005; (28): 661—670. doi:10.1016/j.advwatres.2005.01.005
 12. Krutov A. N., Shkolnikov S. Ya. Equations of a kinematic wave for eroded channels. *Meteorologiya i gidrologiya*. = *Meteorology and Hydrology*. 2021; (6): 43—54. (In Russ.). doi: 10.52002/0130-2906-2021-6-43-54.
 13. Margaryan V. G., Gaidukova E. V., Azizyan L. V., Khaustov V. A. On the forecast of the maximum flow rates of the spring flood of the Arpa River. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*. = *Water industry of Russia: problems, technologies, management*. 2022; (3): 75—87. (In Russ.). doi: 10.35567/19994508_2022_3_6.
 14. National Adaptation Plan to Advance Medium and Long-Term Adaptation Planning in Armenia Project “Development of Water Sector Adaptation plan in Armenia”. UNDP/GCF, Ministry of the Environment of Armenia, 2021. Available at: http://www.nature-ic.am/Content/announcements/12796/WSAP_draft_report_eng.pdf (accessed on: 27.11.2022).
 15. Margaryan V. G. On the assessment of long-term fluctuations in the maximum flow of the Marmarik River. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019; (57): 22—31. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-22-31.
 16. Margaryan V. G. Forecast of the maximum flow of the Marmarik River and assessment of its response to global climate change (Armenia). *Geosfernyye issledovaniya = Geospheric Research*. 2019; (4): 35—45. (In Russ.). doi: 10.17223/25421379/13/4.
 17. *Gidrografiya Armyanskoy SSR = Hydrography of the Armenian SSR*. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of Arm. SSR, 1981: 177 p. (In Armenian).
 18. *Fizicheskaya geografiya Armyanskoy SSR = Physical geography of the Armenian SSR*. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of Arm. SSR, 1971: 470 p. (In Armenian).
 19. Margaryan V. G., Gaidukova E. V., Sedrakyan A. M., Vinokurov I. O. Evaluation of the features of the distribution of the maximum runoff of spring floods in the current conditions of climate change in the Marmarik River basin. *Uchenye zapiski YSU. Geologiya i geografiya = Scientific Notes of YSU. Geology and Geography*. 2022; 56(2): 102—113. (In Russ.). <https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2022.56.2.102>
 20. Gaidukova E. V., Victorova N. V. *Chislennyye metody v gidrologii = Numerical methods in hydrology*. St. Petersburg: Russian State Humanitarian University, 2019: 112 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Гайдукова Екатерина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии РГГМУ, oderiut@mail.ru.

Маргарян Вардуи Гургеновна, канд. геогр. наук, доцент, Ереванский государственный университет, географический и геологический факультет, кафедра физической географии и гидрометеорологии, vmargaryan@ysu.am.

Винокуров Игорь Олегович, старший преподаватель кафедры инженерной гидрологии РГГМУ, igor.o.vinokurov@yandex.ru.

Мисакян Амалия Эдвардовна, канд. техн. наук, руководитель отдела гидрологических прогнозов, Служба Гидрологии «Центр гидрометеорологии и мониторинга» ГНО, Министерство окружающей среды Республика Армения, miamalya@yandex.ru.

Кулешова Марта Александровна, студент РГГМУ, martaklshv@gmail.com.

Information about authors

Gaidukova Ekaterina Vladimirovna, Ph.D. tech. Sci., Associate Professor, Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, RSHU.

Margaryan Varduhi Gurgeni, Ph.D geogr. Sci., Associate Professor of the Department of Physical Geography and Hydrometeorology, Yerevan State University, Faculty of Geography and Geology, Department of Physical Geography and Hydrometeorology.

Vinokurov Igor Olegovich, senior lecturer. Department of Engineering Hydrology, RSHU.

Misakyan Amalya Edvardi, Ph.D. tech. Sci., Head of Hydrological Forecasts Division of Hydrology Service, «Hydrometeorology and Monitoring Center» SNCO, Ministry of Environment Republic of Armenia.

Kuleshova Marta Alexandrovna, student of the Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 27.04.2023

Принята в печать 23.05.2023

The article was received on 27.04.2023

The article was accepted 23.05.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 293—310.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):293—310.

OCEANOLOGIA

Научная статья
УДК 551.465.63(261.1)
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-293-310

Межгодовая изменчивость температуры поверхности океана в полярных широтах Атлантического океана

***Николай Викторович Никольский, Юрий Владимирович Артамонов,
Елена Александровна Скрипалева***

ФГБУН ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, nikolsky.geo@gmail.com

Аннотация. По данным реанализа OI SST за период с 1982 по 2017 гг. выявлены общие закономерности и региональные различия в межгодовой изменчивости температуры поверхности океана в полярных широтах Атлантического океана. В обоих полярных бассейнах положение областей с высоким уровнем межгодовой изменчивости температуры качественно совпадает с положением интенсивных течений. Тенденции многолетней изменчивости температуры поверхности океана в Арктике и Антарктике заметно различаются. В Атлантическом секторе Арктики преобладают значимые положительные тренды, Антарктики — значимые отрицательные тренды. В Арктике максимальные значения положительных трендов наблюдаются в августе—сентябре, в Антарктике максимальные по абсолютной величине отрицательные тренды наблюдаются с августа по октябрь.

Ключевые слова: Атлантические секторы Арктического и Антарктического бассейнов, температура поверхности океана, линейные тренды, геострофические течения

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0004 «Океанологические процессы».

Для цитирования: Никольский Н. В., Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А. Межгодовая изменчивость температуры поверхности океана в полярных широтах Атлантического океана // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 293—310. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-293-310.

OCEANOLOGY

Original article

Interannual variability of sea surface temperature at the polar latitudes of the Atlantic Ocean

Nikolai V. Nikolskii, Yuri V. Artamonov, Elena A. Skripaleva

FSBSI FRC Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

Summary. The general regularities and regional differences in the interannual variability of the sea surface temperature in the polar latitudes of the Atlantic Ocean are revealed according to the OI SST

reanalysis data for period 1982—2017. The reanalysis contains daily average sea surface temperature values at the nodes of a regular grid $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. In this work, areas where the ice concentration did not exceed 90 % were analyzed. In both polar basins, the position of areas with a high level of sea surface temperature interannual variability qualitatively coincides with the position of intense currents. The maximum values of linear sea surface temperature trends are observed in areas of the maximum level of interannual variability, while the trends in long-term sea surface temperature variability in the Arctic and Antarctic are noticeably different. Significant positive sea surface temperature trends prevail in the Atlantic sector of the Arctic. Significant negative trends have been identified only off the northeastern coast of Greenland and north of the Arctic Current. The sea surface temperature decrease on a long-term scale in this area is associated with an increase of cold water transport by the East Greenland and Arctic currents, which are formed as a result of the intensive melting of Arctic ice observed in recent decades. In the Atlantic sector of the Antarctic, on the contrary, significant negative sea surface temperature trends prevail. In the Arctic, the maximum values of positive sea surface temperature trends are observed in August—September during the period of maximum warming of surface waters and minimum concentration of drifting ice. In the Antarctic, the maximum negative sea surface temperature trends in absolute value are observed from August to October, during the period of surface water cooling and maximum ice concentration.

Keywords: Atlantic sectors of the Arctic and Antarctic basins, sea surface temperature, linear trends, geostrophic currents

Acknowledgments: The study was carried out within the framework FSBSI FRC MHI State Order FNNN-2021-0004 «Oceanological processes».

For citation: Nikolskii N. V., Artamonov Y. V., Skripaleva E. A. Interannual variability of sea surface temperature at the polar latitudes of the Atlantic Ocean. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):293—310. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-293-310.

Введение

Арктический и Антарктический бассейны обладают огромным ресурсным потенциалом, что способствует активизации хозяйственно-административной и научной деятельности в этих регионах. В условиях, наблюдаемых в настоящее время, климатических изменений [1—9] все более актуальными становятся исследования изменений структуры вод в полярных бассейнах в сезонном и межгодовом временных масштабах, которые оказывают существенное воздействие на региональный климат и экосистему [2—5, 7, 8, 10]. В этих исследованиях важную роль играют оценки крупномасштабной изменчивости поля температуры как индикатора теплосодержания деятельного слоя океана, в значительной степени определяющего протекание глобальных атмосферных процессов [4, 6, 10—22]. В настоящее время имеется большое количество работ, в которых анализируется долгопериодная изменчивость температуры в отдельных районах Арктического и Антарктического бассейнов [4, 6, 10—22]. По данным гидрологических измерений для Арктического бассейна за период 1980—1996 гг. было показано, что в Норвежском и Баренцевом морях хорошо выражена сезонная и межгодовая изменчивость температуры слоя Атлантических вод (АВ), проникающих в Арктический бассейн. При этом наибольшие амплитуды сезонных колебаний наблюдаются в верхнем 200-метровом слое, тогда как межгодовая изменчивость лучше выражена в промежуточных и глубинных слоях [11]. В работе [12] на основе данных зимних съемок в центральной части Северного Ледовитого океана в 1973—1979 гг. и архивных данных летних и зимних наблюдений в море Лаптевых за период 1960—2000 гг. показано, что максимальный уровень изменчивости температуры в слое АВ наблюдается в котловине Нансена. При этом авторы отмечают,

что нерегулярные синоптические измерения не всегда адекватно отражают фазы арктической изменчивости. Анализ межгодовой и десятилетней изменчивости характеристик воды в Северном Ледовитом океане с использованием данных реанализа Environmental Working Group (EWG) за 1948—1993 гг. со среднегодовым осреднением показал, что в период 1964—1969 гг. отмечалось потепление слоя АВ на большей части Северного Ледовитого океана, а в течение 1970-х и 1980-х годов преобладал холодный период [13]. В работе [15] на основе базы гидрологических данных WOD за 1900—2006 гг. было показано, что в Баренцевом море после начала 1980-х годов наблюдалось заметное потепление вод в слое АВ и среднегодовая температура в слое 100—150 м повышалась со скоростью почти $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в год. При этом повышение температуры в Баренцевом море хорошо коррелирует с индексом Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), определяемым как среднее значение температуры поверхности моря для региона $0\text{—}70^{\circ}$ с.ш. Атлантического океана. В работе [16] по данным наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» было показано, что в Баренцевом море межгодовые колебания температуры воды в верхнем 50-метровом слое вносят примерно 33 % в изменчивость ее суммарной дисперсии. По данным океанографических наблюдений за период 1940—2012 гг. [17] было выявлено, что в Гренландском море во временной изменчивости аномалий температуры наблюдались отрицательные аномалии с 1960-х до конца 1990-х гг. и заметные положительные аномалии в последующие годы, при этом повышение температуры воды происходило до глубин 2000—3000 м. В Лабрадорском море увеличение температуры воды было менее выражено и наблюдалось только до глубины 1000 м. В проливе Фрама после 2000 г. потепление водных масс прослеживалось до глубины 3000 м [17].

В работах, посвященных Южному океану, также выявлены особенности межгодовых изменений гидрологических параметров. В работе [10] на основе данных реанализа OI SST за период 1981—2005 гг. проанализирована межгодовая изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) в районе о. Южная Георгия и оценено влияние на эту изменчивость крупномасштабных мод атмосферной изменчивости. Показано, что межгодовые аномалии ТПО, формирующиеся в Тихом океане под влиянием событий Эль-Ниньо—Южное колебание, распространяются на восток и достигают о. Южная Георгия. На изменчивость поля ТПО в этом районе оказывает влияние также Южная кольцевая мода. Анализ межгодовой изменчивости ТПО по данным спутниковых измерений радиометрами AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometers) показал, что в период 1982—2005 гг. в пределах 300—1000-километровой полосы северу от побережья Антарктиды наблюдался рост ТПО со скоростью $0,01 \pm 0,005\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а для Южного океана в целом был выявлен отрицательный тренд ТПО, составляющий $-0,02 \pm 0,003\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ [18]. В работе [19] на основе данных реанализа Simple Ocean Data Assimilation (SODA) были проанализированы изменения меридиональной циркуляции и потоков тепла в Южном океане к югу от Австралии за период 1958—2005 гг. и показано устойчивое повышение температуры в верхнем 1000-метровом слое океана. Для этого же района по данным ХВТ измерений температуры в слое $0\text{—}800$ м на разрезе Хобарт (Тасмания) — Антарктида за период 1992—2017 гг. были выявлены три

области с различными межгодовыми тенденциями температуры. Это потепление субантарктических вод ($0,29 \pm 0,09$ °C за декаду), охлаждение приповерхностных субполярных вод ($-0,07 \pm 0,04$ °C за декаду); потепление подповерхностных субполярных глубинных воды ($0,04 \pm 0,01$ °C за декаду) [20]. Оценка многолетних трендов теплосодержания всего Южного океана по данным базы WOD 2005 показала прогрев всего 1000-метрового слоя, при этом потепление наблюдается в пределах Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) [21]. Анализ линейных трендов температуры поверхности Атлантического океана к югу от 70° с.ш. по данным массива спутниковых измерений ТПО за период 1986—2002 гг. показал тесную связь распределения трендов с особенностями крупномасштабной циркуляции вод. В зонах действия течений, переносящих теплые поверхностные воды из тропических областей, большую часть года наблюдаются положительные тренды ТПО; в зонах течений, переносящих холодные воды, наоборот, преобладают отрицательные тренды [22]. По данным реанализа OI SST за период с 1982 по 2017 гг. проанализирована межгодовая изменчивость и тренды ТПО в юго-восточной части Тихого океана и в западной части Южной Атлантики [23]. Выявлены две области статистически значимых трендов аномалий ТПО противоположного знака на Патагонском шельфе — положительных между 42° и 45° ю.ш. и отрицательных между 49° и 52° ю.ш. В целом в Атлантике к югу от Южной Америки (южнее 50° ю.ш.) на межгодовом масштабе отмечается понижение ТПО (тренд до $-0,3$ °C/10 лет).

Анализ трендов теплосодержания всего Мирового океана в слое 0—700 м за два временных периода 1993—2019 гг. и 1968—2019 гг. показал, что на фоне преимущественного потепления Мирового океана использование более длительных периодов приводит к увеличению процентной доли площади океана со статистически значимым потеплением [9].

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что большинство исследований не только относится к отдельным районам Арктического и Антарктического бассейнов, но и базируется на различных типах данных с разным временным периодом. Общие закономерности и региональные различия межгодовой изменчивости поля температуры в Арктике и Антарктике практически не обсуждаются.

В данной работе на основе современного реанализа с высоким пространственно-временным разрешением с использованием единого методического подхода сопоставляются особенности межгодовой изменчивости поля температуры в полярных регионах Атлантического океана.

Методика исследования

В работе рассматривались районы Атлантических секторов полярных бассейнов между 45° з.д. и 25° в.д. к северу от 60° с.ш. в Арктике, между 70° з.д. и 20° в.д. к югу от 50° ю.ш. в Антарктике. Для этой цели использовались данные реанализа NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OI SST) [24], содержащего среднесуточные значения температуры поверхности океана в узлах

регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$ за период с января 1982 г. по декабрь 2017 г. При создании массива применялся метод оптимальной интерполяции спутниковых и контактных измерений температуры, который позволил получить данные ТПО даже в случае, когда площадь поверхности, свободная от льда в пределах трапеции $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, составляла всего 5 % [25]. В работе анализировались области, где сплоченность льда не превышала 80 %. Уровень межгодовой изменчивости ТПО оценивался по ее среднеквадратическим отклонениям (СКО), рассчитанным по временным рядам, состоящим из 36-ти среднемесячных значений ТПО для января, февраля и т.д., которые затем осреднялись за все 12 месяцев ($\text{СКО}_{\text{мес}}$). Для расчета среднесезонного сезонного СКО ($\text{СКО}_{\text{сез}}$) по среднесуточным значениям ТПО были получены временные ряды ее среднемесячных значений, по которым вычислялись внутригодовые СКО ТПО для каждого года и затем осреднялись за 36 лет. Тенденции межгодовой изменчивости ТПО оценивались по распределениям линейных трендов, рассчитанных по всему временному ряду в 432 месяца с 1982 по 2017 гг. (тренд за весь период) и по временным рядам, состоящим из 36-ти среднемесячных значений ТПО для каждого месяца (помесечные тренды). Статистическая достоверность трендов оценивалась по критерию Манна—Кендалла с уровнем статистической значимости $\alpha = 0,05$ (95 %-ный уровень достоверности) [26, 27]. Для интерпретации пространственного распределения величин $\text{СКО}_{\text{мес}}$ и трендов анализировалась среднегодовая структура течений по данным реанализа Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) [28], содержащего среднесуточные значения составляющих геострофической скорости на поверхности океана в узлах регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$ за период 1993—2020 гг. По этим значениям рассчитывались их климатические среднемесячные и среднегодовые значения, по которым затем определялись величины модуля скорости $|\vec{v}_g|$ и направления векторов течений.

Результаты исследований

Пространственные распределения $\text{СКО}_{\text{мес}}$ ТПО (рис. 1 а, б) показали, что в обоих полярных бассейнах положение областей с высоким уровнем межгодовой изменчивости ТПО качественно совпадает с положением интенсивных течений (рис. 1 в, г). В Арктике в зонах Северо-Атлантического течения, течения Ирмингера, ветвей Норвежского течения, Нордкапского, Восточно-Гренландского, Западно-Шпицбергенского, Восточно-Исландского и Северо-Исландского течений величины $\text{СКО}_{\text{мес}}$ превышают $0,8^\circ\text{C}$ (рис. 1 а, в). Общее повышение уровня межгодовой изменчивости ТПО ($\text{СКО}_{\text{мес}}$ выше $0,6^\circ\text{C}$) наблюдается южнее Арктического течения. Максимальные значения $\text{СКО}_{\text{мес}}$, достигающие $1,3^\circ\text{C}$, отмечаются в зонах Северо-Исландского, Восточно-Гренландского и Западно-Шпицбергенского течений (рис. 1 а, в).

В Антарктике повышение уровня межгодовой изменчивости ТПО (величины $\text{СКО}_{\text{мес}}$ выше $0,5^\circ\text{C}$) прослеживается в зоне Антарктического циркумполярного течения (рис. 1 б, г). Максимальные величины $\text{СКО}_{\text{мес}}$ ($0,8$ — 1°C) наблюдаются в зонах Северной (СВ) и Центральной (ЦВ) ветвей АЦТ в проливе Дрейка и

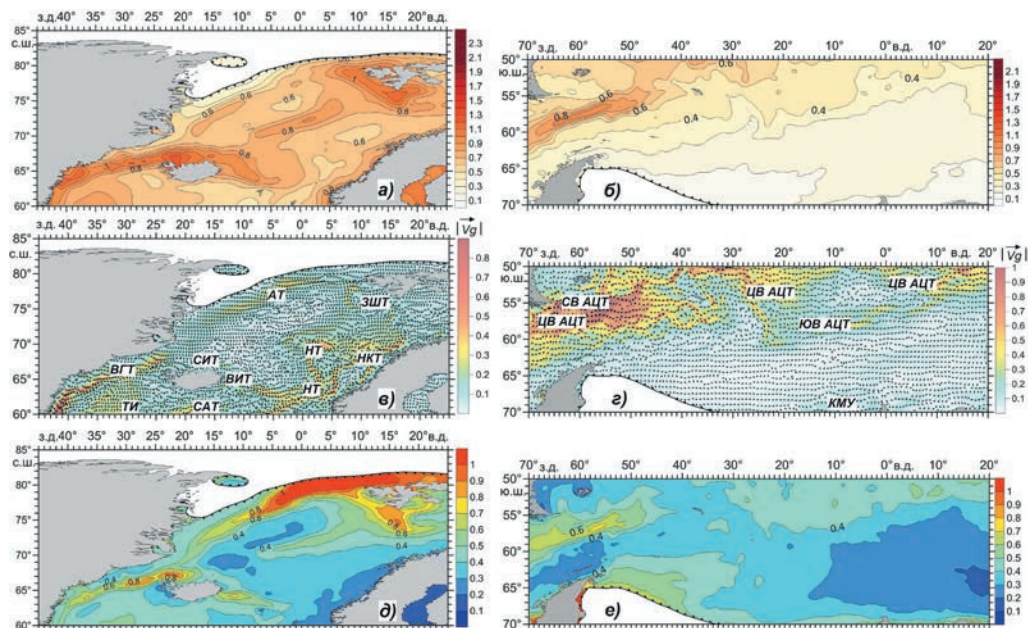


Рис. 1. Распределение статистических параметров ТПО, модуля и векторов геострофической скорости течений в полярных широтах Атлантического океана:

a, б — $СКО_{\text{меж}} \text{ ТПО} (\text{°C})$, *в, г* — модуль и векторы геострофической скорости (м/с),
д, е — отношение $СКО_{\text{меж}} \text{ ТПО} / СКО_{\text{сез}} \text{ ТПО}$, *а, в, д* — Атлантический сектор Арктики,
б, г, е — Атлантический сектор Антарктики.

Здесь и на рис. 3 и 6 жирные черные линии — среднегодовые границы дрейфующих льдов 80 %-ной сплоченности.

Fig. 1. Distribution of SST statistical parameters, module and vectors of geostrophic current velocity in the polar latitudes of the Atlantic Ocean:

a, б — $SST \text{ RMSD}_{\text{interann}} (\text{°C})$, *в, г* — module and vectors of geostrophic velocity (m/s),
д, е — ratio of $SST \text{ RMSD}_{\text{interann}} / SST \text{ RMSD}_{\text{seas}}$, *а, в, д* — Atlantic sectors of the Arctic,
б, г, е — Atlantic sectors of the Antarctic.

Here and in Fig. 3 and 6 bold black lines are the annual averaged boundaries of drifting ice with 80 % concentration.

в западной части моря Скоша (рис. 1 *б, г*). К югу от Южной ветви АЦТ (ЮВ АЦТ) значения $СКО_{\text{меж}}$ уменьшаются до 0,3—0,4 °C. В круговороте моря Уэдделла (КМУ) и в море Лазарева уровень межгодовой изменчивости ТПО минимален, величины $СКО_{\text{меж}}$ не превышают 0,2 °C (рис. 1 *б*).

Пространственные распределения величин отношения межгодовой $СКО_{\text{меж}}$ к сезонному ($СКО_{\text{меж}} / СКО_{\text{сез}}$) показали, что в Арктике в зонах Арктического и Восточно-Гренландского течений и в северной части Западно-Шпицбергенского течения (рис. 1 *д*) уровень межгодовой изменчивости ТПО сопоставим с уровнем ее сезонной изменчивости ($СКО_{\text{меж}} / СКО_{\text{сез}}$ составляет 0,8—1,1). На остальной части акватории это соотношение не превышает 0,4—0,5, т.е. уровень

межгодовой изменчивости вдвое ниже уровня сезонных колебаний ТПО. В области Норвежского и Нордкапского течений величины $СКО_{\text{меж}}$ почти в 5 раз ниже, чем $СКО_{\text{сез}}$ (рис. 1 *д*). В Антарктике (рис. 1 *е*) почти на всей акватории величины $СКО_{\text{меж}}/СКО_{\text{сез}}$ ТПО не превышают 0,3—0,4. Только в области максимального уровня межгодовой изменчивости ТПО в западной части акватории в зоне Северной ветви АЦТ это отношение повышается до 0,6—0,7. Некоторое увеличение значений $СКО_{\text{меж}}/СКО_{\text{сез}}$ (до 0,5—0,6) наблюдается в северо-западной части моря Уэдделла ближе к границе дрейфующих льдов (рис. 1 *е*). Таким образом, в Атлантическом секторе Арктического бассейна уровень межгодовой изменчивости ТПО по сравнению с уровнем ее сезонной изменчивости заметно выше, чем в Атлантическом секторе Антарктики.

Для выявления общих тенденций межгодовой изменчивости ТПО были проанализированы временные ряды среднемесячных аномалий ТПО, осредненной по всей акватории каждого из бассейнов (рис. 2). Аномалии рассчитывались как разность фактической величины ТПО за конкретный месяц конкретного года и климатического среднесного значения ТПО для этого месяца, что позволило минимизировать проявление сезонного цикла ТПО в межгодовых рядах. Анализ межгодовых рядов аномалий ТПО показал, что наблюдаются различия тенденций межгодовой изменчивости в Атлантических секторах Арктики и Антарктики (рис. 2). Величины максимальных положительных и отрицательных аномалий ТПО в Арктике (1,1—1,2 °С по абсолютной величине) более чем в 2 раза превышают максимальные аномалии, наблюдаемые в Антарктике (0,4—0,5 °С по абсолютной величине).

В Арктике наблюдается хорошо выраженная смена знака аномалий ТПО с отрицательных на положительные примерно с 1998 г. Смена знака аномалий ТПО в Арктике хорошо согласуется с наступлением положительной фазы АМО

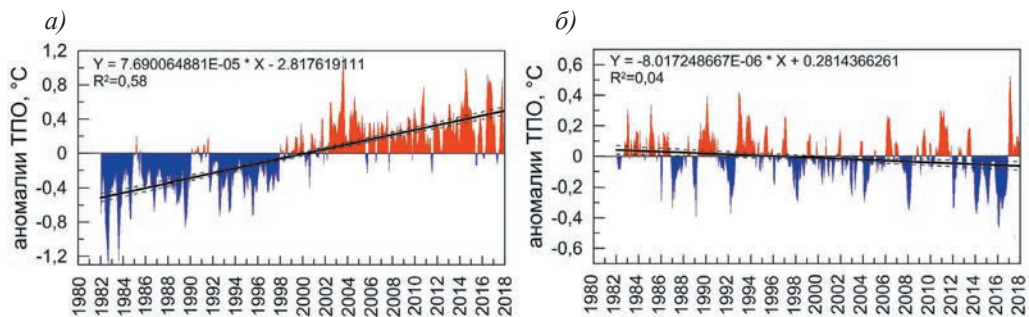


Рис. 2. Межгодовая изменчивость среднемесячных аномалий ТПО осредненных для Атлантических секторов Арктики (*а*) и Антарктики (*б*) с января 1982 по декабрь 2017 гг.

Штриховые линии — границы доверительного интервала 95 %-ного уровня статистической достоверности.

Fig. 2 Interannual variability of average monthly SST anomalies averaged for the Atlantic sectors of the Arctic (*a*) and Antarctica (*b*) from January 1982 to December 2017.

Dashed lines are the boundaries of the confidence interval of the 95 % level of statistical significance.

и резким повышением значений ее индекса после 1996—1997 гг. [6, 15, 29, 30]. До 1998 г. слабые положительные аномалии наблюдались только в течение 1991 и 1992 гг. (рис. 2 а). В Антарктике отмечается чередование положительных и отрицательных аномалий ТПО с периодичностью примерно 2—5 лет, соответствующей периодичности Южного колебания и Южной кольцевой моды (рис. 2 б).

Временной ряд аномалий ТПО в Арктике содержит хорошо выраженный положительный линейный тренд, в то время как в распределении аномалий в Антарктике наблюдается слабый незначимый отрицательный тренд (рис. 2). Следует отметить, что сравнительный анализ трендов площади распространения морского льда в Северном и Южном полушарии за период 1979—2017 гг. по спутниковым данным также выявил принципиальные отличия в характере трендов. Если в Арктике в течение всего рассматриваемого периода происходило постоянное уменьшение ледовитости, то в Антарктике до 2014 г. наблюдалось

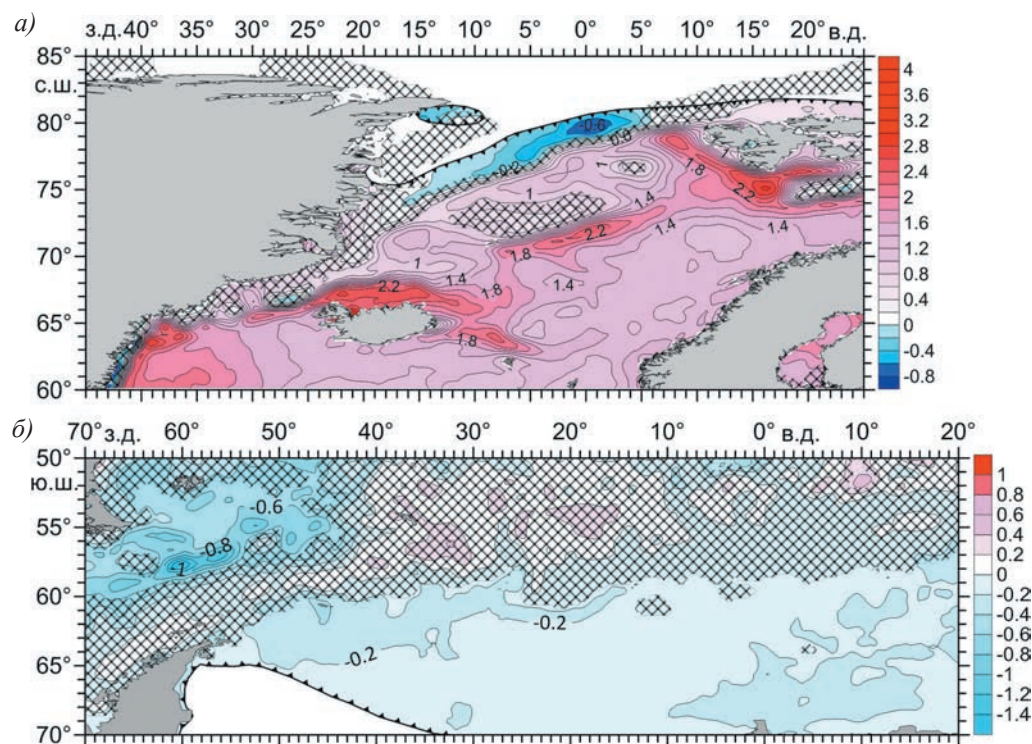


Рис. 3. Распределение линейных трендов ТПО за весь временной период ($^{\circ}\text{C}/432$ мес.).

а) Атлантический сектор Арктики, б) Атлантический сектор Антарктики.

Здесь и на рисунках 4 и 6 области трендов с достоверностью ниже 95 % заштрихованы.

Fig. 3. Distributions of SST linear trends for the entire time period ($^{\circ}\text{C}/432$ months).

а) Atlantic sector of the Arctic; б) Atlantic sector of the Antarctic.

Here and in Figures 4 and 6, trend areas with a confidence below 95 % are shaded.

увеличение площади морского льда, а затем началось ее быстрое уменьшение [31].

Пространственные распределения линейных трендов ТПО за весь временной период 1982—2017 гг. (рис. 3), показали, что их максимальные величины наблюдаются в областях повышенного уровня межгодовой изменчивости, т.е. в зонах наибольших значений $СКО_{\text{меж}}$ ТПО. При этом так же, как и в распределении межгодовых рядов аномалий ТПО, тенденции многолетней изменчивости ТПО в Арктике и Антарктике заметно различаются.

В Атлантическом секторе Арктики (рис. 3 а) преобладают значимые положительные тренды ТПО, которые на большей части акватории составляют 1,2—1,8 °C/432 мес. В зонах Северо-Исландского, Восточно-Исландского, Восточно-Гренландского и Западно-Шпицбергенского течений величины трендов достигают 2,2—3 °C/432 мес. Значимые отрицательные тренды (до $-0,8$ °C/432 мес.) выявлены у северо-восточных берегов Гренландии и севернее Арктического течения. Долговременное понижение ТПО в этом районе связано с увеличением выноса Восточно-Гренландским и Арктическим течениями холодных вод, образующихся в результате интенсивного таяния арктических льдов, наблюдаемого в последние десятилетия [4, 6, 15, 29, 31—33].

В Атлантическом секторе Антарктики преобладают значимые отрицательные тренды ТПО (рис. 3 б). Максимальные значения трендов достигают $-1,2$ °C/432 мес. и наблюдаются в западной части акватории и в проливе Дрейка. Выявленное устойчивое понижение ТПО на межгодовом масштабе в этом районе хорошо согласуется с результатами работы [23], также базирующейся на данных реанализа OI SST. К югу от Южной ветви АЦГ в морях Уэдделла и Лазарева наблюдаются значимые отрицательные тренды, величины которых не превышают $-0,4 \dots -0,2$ °C/432 мес.

Область слабых положительных трендов с достоверностью ниже 95 %, не превышающих $0,2$ °C/432 мес., прослеживается к северу от Антарктического полуострова и далее вытягивается на северо-восток, располагаясь в зоне АЦГ. Восточнее 40° з.д. на отдельных участках внутри этой области величины положительных трендов несколько увеличиваются и достигают $0,3—0,4$ °C/432 мес. (рис. 3 б).

Общую закономерность межгодовой изменчивости ТПО в Атлантических секторах Арктики и Антарктики, а именно увеличение уровня межгодовой изменчивости ТПО и значений ее трендов в зонах интенсивных геострофических течений, наглядно иллюстрируют распределение величин $|\vec{v}g|$, $СКО_{\text{меж}}$ ТПО и трендов вдоль отдельных меридианов (рис. 4).

Отметим, что положение стрежней (максимумов скорости) течений восточного направления несколько смещено относительно положения максимумов $СКО_{\text{меж}}$ и трендов — в Арктике преимущественно к югу, а в Антарктике к северу.

В Арктике в зонах ветвей Восточно-Гренландского течения и течения Ирмингера на меридиане $28,875^\circ$ з.д., в зонах Восточно-Исландского течения на меридиане $9,875^\circ$ з.д., ветвей и меандров Норвежского течения на меридиане

0,125° в.д., Западно-Шпицбергенского течения на меридиане 10,125° в.д. величины $СКО_{\text{меж}}$ ТПО и трендов ТПО увеличиваются до 1—1,2 °C и 2—2,2 °C/432 мес. соответственно, в зоне ветвей Нордкапского течения на меридиане 10,125° в.д. — до 0,8 °C и 1,4—1,5 °C/432 мес. соответственно. К северу от Арктического

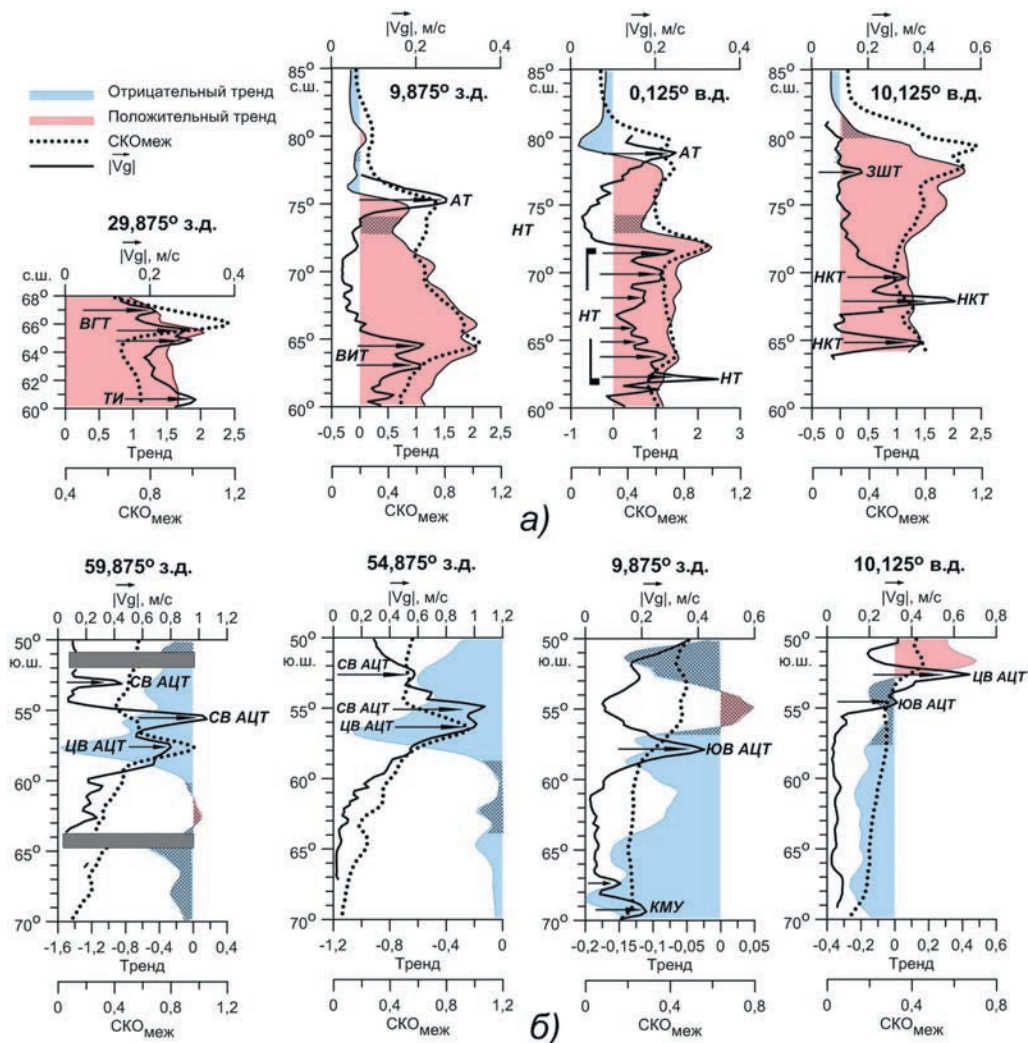


Рис. 4. Распределение среднегодовых величин $СКО_{\text{меж}}$ ТПО (°C), линейных трендов ТПО (°C/432 мес.) и модуля $|Vg|$ геострофической скорости вдоль отдельных меридианов.

а) Атлантический сектор Арктики, б) Атлантический сектор Антарктики.

Fig. 4. Distributions of annual averaged values of SST RMSD_{interann.} (°C), SST linear trends (°C/432 months) and geostrophic velocity modulus along individual meridians.

а) Atlantic sector of the Arctic; б) Atlantic sector of the Antarctic.

течения наблюдаются слабые отрицательные тренды ТПО, не превышающие $-0,3 \text{ }^\circ\text{C}/432 \text{ мес.}$. Максимальные по абсолютной величине отрицательные тренды, достигающие $-0,8 \text{ }^\circ\text{C}/432 \text{ мес.}$, отмечаются на меридиане $0,125^\circ \text{ в.д.}$ (рис. 4 а).

В Антарктике на меридианах $59,875^\circ$ и $54,875^\circ \text{ з.д.}$ в зоне струй Северной ветви АЦТ величины трендов ТПО достигают $-0,8 \dots -0,5 \text{ }^\circ\text{C}/432 \text{ мес.}$, в зоне Центральной ветви АЦТ возрастают до $-1,6 \dots -1,2 \text{ }^\circ\text{C}/432 \text{ мес.}$ Восточнее величины трендов заметно уменьшаются, тем не менее в зоне Южной ветви АЦТ и на северной периферии круговорота моря Уэдделла (КМУ) отмечается тенденция к их увеличению до $-0,2 \dots -0,15 \text{ }^\circ\text{C}/432 \text{ мес.}$ Наибольшее увеличение СКО_{мес} ТПО (до $0,8-1 \text{ }^\circ\text{C}$) отмечается в западной части акватории в зоне Центральной ветви АЦТ (рис. 4 б).

Распределение месячных трендов ТПО, осредненных по акваториям Атлантических секторов полярных бассейнов (рис. 5), показали, что их величины заметно изменяются в течение года.

В Арктике максимальные значения положительных трендов ТПО наблюдаются в августе—сентябре в период максимального прогрева поверхностных вод и минимальной сплоченности дрейфующих льдов. В марте—апреле, когда концентрация льдов максимальна, значения положительных трендов ТПО минимальны (рис. 5 а). В Антарктике максимальные по абсолютной величине отрицательные тренды ТПО наблюдаются с августа по октябрь, в период выхолаживания поверхностных вод и максимальной концентрации льдов, минимальные — в январе—марте, в период максимального прогрева вод и уменьшения концентрации дрейфующего льда (рис. 5 б).

Распределение месячных оценок трендов ТПО по широте вдоль отдельных меридианов, примеры которых представлены на рис. 6, показали, что повышенные значения трендов, так же, как и в случае распределения трендов за весь

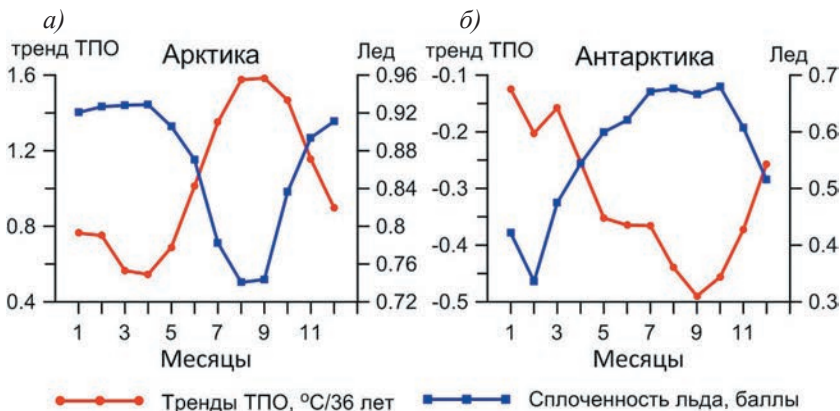


Рис. 5. Распределение месячных значений линейных трендов ТПО и сплоченности льда, осредненных для Атлантических секторов Арктики (а) и Антарктики (б).

Fig. 5. Distributions of monthly values of SST linear trends and ice concentration, averaged for the Atlantic sectors of the Arctic (a) and Antarctic (b).

период, наблюдаются в зонах интенсивных течений. Так, величины трендов в зонах Восточно-Гренландского и Восточно-Исландского течений в течение всего года превышают соответственно 1,4 °C/36 лет (рис. 6 а, б). При этом в Арктике

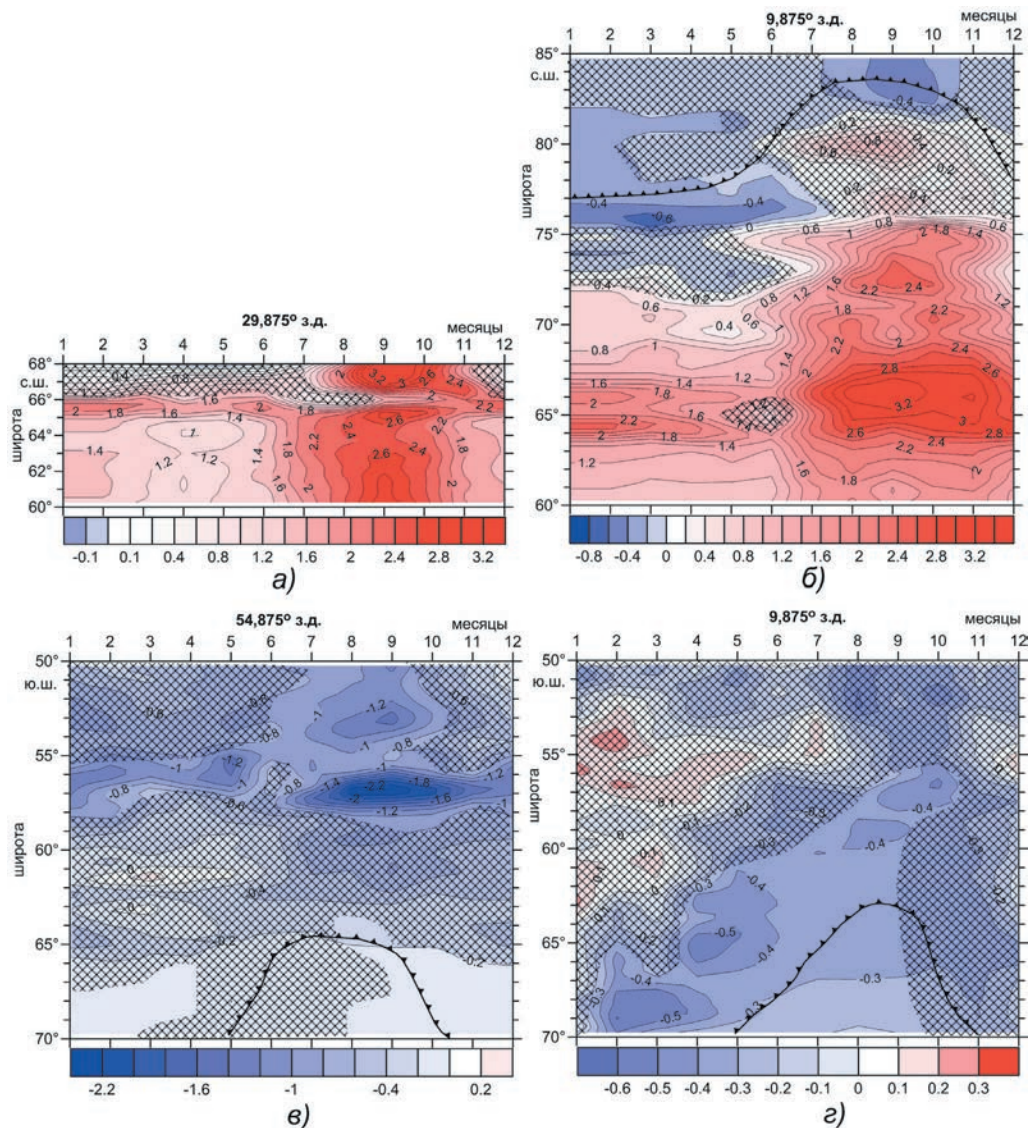


Рис. 6. Диаграммы Ховмёллера для значений трендов ТПО на меридианах 29,875° з.д. (а) и 9,875° з.д. (б) в Арктике, 54,875° з.д. (в) и 9,875° з.д. (г) в Антарктике.

Fig. 6. Hovmöller diagrams for the values of SST trends for the meridians of 29,875° W (а) and 9,875° W (б) in the Arctic, 54,875° W (в) and 9,875° W (г) in the Antarctic.

на всей акватории сохраняется тенденция увеличения положительных трендов в августе—сентябре. В эти месяцы в зонах Восточно-Гренландского и Восточно-Исландского течений величины трендов достигают $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$ (рис. 6 а, б), в зоне течения Ирмингера — $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$ (рис. 6 а).

На северной периферии Трансарктического течения с января по июль наблюдаются значимые отрицательные тренды ТПО, максимум которых ($-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$) отмечается в феврале—марте, с августа по декабрь тренды становятся положительными, но статистическая достоверность их ниже 95 %. Значимые положительные тренды наблюдаются на южной периферии АТ с июня по декабрь с максимумом ($2,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$) в сентябре (рис. 6 б). В целом к северу от границы льдов 80 %-ной сплоченности в течение года тренды ТПО отрицательны.

В Антарктике наибольшие отличия в изменении величин помесечных трендов отмечаются в зоне АЦТ и к югу от Южной ветви АЦТ. В проливе Дрейка и в западной части моря Скоша в зоне Северной и Центральной ветвей АЦТ максимальные отрицательные тренды ($-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$ и $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$ соответственно) наблюдаются в августе—сентябре (рис. 6 в). В круговороте моря Уэдделла в результате сезонного выхолаживания вод и смещения границы дрейфующих льдов на север отмечается фазовое запаздывание периодов, когда тренды ТПО максимальны. Максимальные тренды ($-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$... $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$) наблюдаются южнее 67° ю.ш. в феврале—марте, между 66° и 61° ю.ш. — в апреле—мае, севернее 60° ю.ш. — в августе, а на южной периферии АЦТ — в сентябре—октябре (рис. 6 г).

Заключение

По данным реанализа OI SST за период 1982—2017 гг. показано, что в Атлантических секторах полярных бассейнов положение областей с высоким уровнем межгодовой изменчивости температуры качественно совпадает с положением интенсивных течений. В Арктике максимальные значения $\text{СКО}_{\text{меж}}$, достигающие $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, отмечаются в зонах Северо-Исландского, Восточно-Гренландского и Западно-Шпицбергенского течений. В Антарктике максимальные величины $\text{СКО}_{\text{меж}}$ ($0,8\text{—}1\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в зонах Северной и Центральной ветвей Антарктического циркумполярного течения в северо-восточной части пролива Дрейка и в западной части моря Скоша.

Установлено, что в зонах Арктического, Восточно-Гренландского и Западно-Шпицбергенского течений межгодовая изменчивость ТПО сопоставима с уровнем ее сезонной изменчивости ($\text{СКО}_{\text{меж}}/\text{СКО}_{\text{сез}}$ составляют $0,8\text{—}1,1$). В Антарктике почти на всей акватории величины $\text{СКО}_{\text{меж}}/\text{СКО}_{\text{сез}}$ ТПО не превышают $0,3\text{—}0,4$. В западной части акватории в зоне Северной ветви АЦТ это отношение повышается до $0,6\text{—}0,7$. Увеличение значений $\text{СКО}_{\text{меж}}/\text{СКО}_{\text{сез}}$ до $0,5\text{—}0,6$ наблюдается в северо-западной части моря Уэдделла ближе к границе дрейфующих льдов.

Показано, что в обоих Атлантических секторах полярных бассейнов максимальные значимые линейные тренды ТПО за 36 лет наблюдаются в областях высокого уровня межгодовой изменчивости, при этом в Арктике и Антарктике

тенденции многолетней изменчивости ТПО заметно различаются. В Атлантическом секторе Арктики преобладают значимые положительные тренды, Антарктики — отрицательные. В Арктике на всей акватории наблюдается увеличение положительных трендов в августе—сентябре. В зонах Восточно-Гренландского и Восточно-Исландского течений они достигают $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$, в зоне течения Ирмингера — $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$. На северной периферии Арктического течения с января по июль наблюдаются значимые отрицательные тренды ТПО, максимум которых ($-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$) отмечается в феврале—марте. С августа по декабрь здесь тренды становятся положительными. На южной периферии Арктического течения значимые положительные тренды наблюдаются с июня по декабрь с максимумом ($2,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$) в сентябре.

В Антарктике максимальные отрицательные тренды ($-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$ и $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$ соответственно) выявлены в проливе Дрейка и в западной части моря Скоша в зоне Северной и Центральной ветвей АЦТ в августе—сентябре. В круговороте моря Уэдделла в результате сезонного выхолаживания вод и смещения границы дрейфующих льдов на север отмечается фазовое запаздывание периодов, когда тренды ТПО максимальны. Максимальные тренды ($-0,4 \dots -0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/36\text{ лет}$) наблюдаются южнее 67° ю.ш. в феврале—марте, между 66° и 61° ю.ш. — в апреле—мае, севернее 60° ю.ш. — в августе, а на южной периферии АЦТ — в сентябре—октябре.

Список литературы

1. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J. et al. Antarctic Climate Change during the Last 50 Years // *International Journal of Climatology*. 2005. Vol. 25. No. 3. P. 279—294. doi:10.1002/joc.1130.
2. Anisimov O. A., Vaughan D. G., Callaghan T. V. et al. Polar regions (Arctic and Antarctic). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson, Eds. Cambridge: University Press, 2007. P. 653—685.
3. Алексеев Г. В., Иванов Н. Е., Пнюшков А. В., Балакин А. А. Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 3 (86). С. 22—34.
4. Семенов В. А., Мохов И. И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 4. С. 403—421.
5. Алексеев Г. В., Радионов В. Ф., Александров Е. И. и др. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 1 (103). С. 32—41.
6. Семенов В. А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера — арктические льды — океан // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 232—248.
7. Малинин В. Н. Глобальный экологический кризис и климат // *Ученые записки РГГМУ*. 2017. № 48. С. 11—32.
8. Рябинин В. Э., Сычёв В. И. К десятилетию ООН, посвященному науке об океане в интересах устойчивого развития (2021—2030 гг.) // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 54. С. 73—79. doi:10.33933/2074-2762-2019-54-73-79
9. Johnson G. C., Lyman J.M. Warming trends increasingly dominate global ocean // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. Iss. 8. P. 757—761. doi:10.1038/s41558-020-0822-0.
10. Meredith M. P., Murphy E. J., Hawker E. J. et al. On the interannual variability of ocean temperatures around South Georgia, Southern Ocean: Forcing by El Niño/Southern Oscillation and the Southern Annular Mode // *Deep-Sea Research II*. 2008. Vol. 55. P. 2007—2022. doi:10.1016/j.dsr2.2008.05.020.

11. Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents Seas: 1980—1996 // *Deep Sea Research I*. 2001. Vol. 48. P. 383—404. doi:10.1016/S0967-0637(00)00050-9.
12. Polyakov I., Walsh D., Dmitrenko I. et al. Arctic Ocean variability derived from historical observations // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30. No. 6. 1298, P. 31-1—31-4. doi:10.1029/2002GL016441.
13. Swift J. H., Aagaard K., Timokhov L., Nikiforov E. G. Long-term variability of Arctic Ocean waters: Evidence from a reanalysis of the EEWG data set // *J. of Geophysical Research. Oceans*. 2005. Vol. 110. Iss. C3. C03012. doi:10.1029/2004JC002312.
14. Бойцов В. Д. Изменчивость температуры воды Баренцева моря различных временных масштабов // *Вопросы промышленной океанологии*. М.: Изд-во ВНИРО, 2007. Вып. 4. № 1. С. 99—113.
15. Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. Barents Sea multidecadal variability // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. L19604. doi:10.1029/2009GL039847.
16. Бойцов В. Д., Карсаков А. Л., Аверкиев А. А. и др. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» // *Ученые записки РГГМУ*. 2010. № 15. С. 135—149.
17. Вязилова А. Е., Алексеев Г. В., Смирнов А. В. Связь термохалинных аномалий в Северо-Западной Атлантике и Северо-Европейском бассейна с колебаниями климата // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2014. № 3 (101). С. 48—61.
18. Лебедев С. В. Межгодовая изменчивость температуры поверхности и уровня Южного океана по данным дистанционного зондирования // *Ученые записки РГГМУ*. 2008. № 6. С. 82—88.
19. Johnston B. M., Gabric A. J. Long-term trends in upper ocean structure and meridional circulation of the Southern Ocean south of Australia derived from the SODA reanalysis // *Tellus A*. 2010. Vol. 62. Iss. 5. P. 719—736. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00462.x.
20. Auger M., Morrow R., Kestenare E. et al. Southern Ocean in-situ temperature trends over 25 years emerge from interannual variability // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12 (1). P. 514. doi:10.1038/s41467-020-20781-1.
21. Gille S. T. Decadal-Scale Temperature Trends in the Southern Hemisphere Ocean // *J. of Climate*. 2008. Vol. 21. Iss. 18. P. 4749—4765. doi:10.1175/2008JCLI2131.1.
22. Артамонов Ю. В., Бабий М. В., Букатов А. Е., Скрипалева Е. А. Региональные особенности сезонной изменчивости линейных трендов поля температуры в Атлантическом океане и их связь с крупномасштабной циркуляцией вод // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 4. С. 17—27.
23. Risaro D. B., Chidichimo M. P., Piola A. R. Interannual Variability and Trends of Sea Surface Temperature Around Southern South America // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9:829144. 20 p. doi:10.3389/fmars.2022.829144.
24. URL:https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/DBListFiles.pl?did=132&tid=89459&vid=2423 (дата обращения: 01.12.2022).
25. Reynolds R. W., Smith T. M., Liu C. et al. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature // *J. of Climate*. 2007. Vol. 20. Iss. 22. P. 5473—5496. doi:10.1175/2007JCLI1824.1.
26. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13. Iss. 3. P. 245—259. doi:0012-9682(194507)13:3<245:NTAT>2.0.CO;2-U.
27. Kendall M. G. Rank Correlation Methods. Fourth edition. Griffin: London, 1970. 202 p.
28. URL:http://marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEA-LEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 (дата обращения: 01.12.2022).
29. Холопцев А. В., Гуменный М. М. Изменения ледовитости Арктики и Атлантическая мультideкадная осцилляция // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2017. Том 3 (69). № 2. С. 243—254.
30. Сизов А. А., Баянкина Т. М., Посошков В. Л., Анисимов А.Е. Процессы, определяющие синхронную междесятилетнюю изменчивость поверхностной температуры Баренцева и Черного морей // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38. № 3. С. 276—290. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-276-290.
31. Малинин В. Н., Вайновский П. А. К сравнению характеристик межгодовой изменчивости площади морского льда северного и южного полушария // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 57. С. 77—90. doi:10.33933/2074-2762-2019-57-77-90.

32. Lemke P., Ren J., Alley R. et al. Observations: change in snow, ice and frozen ground. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge: University Press, 2007. P. 337—384. doi:10.1017/CBO9780511546013.
33. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 98—109. doi:10.33933/2074-2762-2019-56-98-109.
34. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 407—434. doi:10.33933/2713-3001-2021-64-407-434.

References

1. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J. et al. Antarctic Climate Change during the Last 50 Years. *International Journal of Climatology*. 2005, 25 (3): 279—294. doi:10.1002/joc.1130.
2. Anisimov O. A., Vaughan D. G., Callaghan T. V. et al. Polar regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson, Eds. Cambridge: University Press, 2007: 653—685.
3. Alekseev G. V., Ivanov N. E., Pnyushkov A. V., Balakin A. A. Climate change in the maritime Arctic at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2010, 3 (86): 22—34. (In Russ).
4. Semenov V. A., Mokhov I. I., Latif M. The role of sea ice boundaries and ocean surface temperature in regional climate changes in Eurasia over recent decades. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean*. 2012, 48 (4): 403—421. (In Russ).
5. Alekseev G. V., Radionov V. F., Alexandrov E. I. et al. Changes in the climate of the Arctic during global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2015, 1 (103): 32—41. (In Russ).
6. Semenov V. A. Oscillations of present-day climate associated with feedbacks in atmosphere — arctic ice — ocean system. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2015, 1: 232—248. (In Russ).
7. Malinin V. N. Global ecological crisis and climate. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2017, 48: 11—32. (In Russ).
8. Ryabinin V. E., Sychev V. I. Towards the decade of ocean science for sustainable development (2021—2030). *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2019, 54: 73—79. doi:10.33933/2074-2762-2019-54-73-79. (In Russ).
9. Johnson G. C., Lyman J. M. Warming trends increasingly dominate global ocean. *Nature Climate Change*. 2020, 10 (8): 757—761. doi:10.1038/s41558-020-0822-0.
10. Meredith M. P., Murphy E. J., Hawker E. J. et al. On the interannual variability of ocean temperatures around South Georgia, Southern Ocean: Forcing by El Niño/Southern Oscillation and the Southern Annular Mode. *Deep-Sea Research II*. 2008, 55: 2007—2022. doi:10.1016/j.dsr2.2008.05.020.
11. Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents Seas: 1980—1996. *Deep Sea Research I*. 2001, 48: 383—404. doi:10.1016/S0967-0637(00)00050-9.
12. Polyakov I., Walsh D., Dmitrenko I. et al. Arctic Ocean variability derived from historical observations. *Geophysical Research Letters*. 2003, 30 (6), 1298: 31-1—31-4. doi:10.1029/2002GL016441.
13. Swift J. H., Aagaard K., Timokhov L., Nikiforov E. G. Long-term variability of Arctic Ocean waters: Evidence from a reanalysis of the EEWG data set. *J. of Geophysical Research. Oceans*. 2005, 110 (C3): C03012. doi:10.1029/2004JC002312.
14. Boitsov V. D. Water temperature variability in the Barents Sea at different time scales. *Voprosy promyslovoj okeanologii = Issues of Commercial Oceanology*. M.: Izd-vo VNIRO. 2007, 4 (1): 99—113. (In Russ).

15. Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. Barents Sea multidecadal variability. *Geophysical Research Letters*. 2009, 36: L19604. doi:10.1029/2009GL039847.
16. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Averkiev A. A. et al. Research of variability hydrophysical characteristics on the «the Kola meridian» cross-section observations. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2010, 15: 135—149. (In Russ).
17. Vyazilova A. E., Alekseev G. V., Smirnov A. V. Connection of thermohaline anomalies in the Northwest Atlantic and the North European Basin with climate fluctuations. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2014, 3 (101): 48—61. (In Russ).
18. Lebedev S. V. Interannual variability in the Southern ocean surface temperature based on remote sensing data. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2008, 6: 82—88. (In Russ).
19. Johnston B. M., Gabric A. J. Long-term trends in upper ocean structure and meridional circulation of the Southern Ocean south of Australia derived from the SODA reanalysis. *Tellus A*. 2010, 62 (5): 719—736, doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00462.x.
20. Auger M., Morrow R., Kestenare E. et al. Southern Ocean in-situ temperature trends over 25 years emerge from interannual variability. *Nature Communications*. 2021, 12(1): 514. doi:10.1038/s41467-020-20781-1.
21. Gille S. T. Decadal-Scale Temperature Trends in the Southern Hemisphere Ocean. *J. of Climate*. 2008, 21 (18): 4749—4765. doi:10.1175/2008JCLI2131.1.
22. Artamonov Yu. V., Babiy M. V., Bukatov A. E., Skripaleva E. A. Regional features of seasonal variability of linear trends in the temperature field in the Atlantic Ocean and their relationship with large-scale water circulation. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*. 2008, 4: 17—27. (In Russ).
23. Risaro D. B., Chidichimo M. P., Piola A. R. Interannual Variability and Trends of Sea Surface Temperature Around Southern South America. *Frontiers in Marine Science*. 2022, 9: 829144. 20 p. doi:10.3389/fmars.2022.829144.
24. URL:https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/DBListFiles.pl?did=132&tid=89459&vid=2423 (accessed on: 01.12.2022).
25. Reynolds R. W., Smith T. M., Liu C. et al. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. of Climate*. 2007, 20 (22): 5473—5496. doi:10.1175/2007JCLI1824.1.
26. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13. Iss. 3. P. 245—259. doi:0012-9682(194507)13:3<245:NTAT>2.0.CO;2-U.
27. Kendall M. G. Rank Correlation Methods. Fourth edition. Griffin: London, 1970. 202 p.
28. URL:http://marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEA-LEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 (accessed on: 01.12.2022).
29. Holopcev A. V., Gumennyj M. M. Arctic Ice Cover Changes and the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Uchyonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya = Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2017, 3(69) (2): 243—254. (In Russ).
30. Sizov A. A., Bayankina T. M., Pososhkov V. L., Anisimov A. E. Processes Determining Synchronous Interdecadal Variability of Surface Temperature in the Barents and Black Seas. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*. 2022, 38 (3): 276—290. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-276-290. (In Russ).
31. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Comparison of characteristics of the annual variability of the area of sea ice of the north and south. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2019, 57: 77—90. doi:10.33933/2074-2762-2019-57-77-90. (In Russ).
32. Lemke P., Ren J., Alley R. et al. Observations: change in snow, ice and frozen ground. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge: University Press, 2007: 337—384. doi:10.1017/CBO9780511546013.*
33. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will ice-free regime of different Arctic regions come on? *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of RSHU*. 2019, 56: 98—109. doi:10.33933/2074-2762-2019-56-98-10. (In Russ).

34. Ivanov V. V. Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021, 64: 407—434. doi:10.33933/2713-3001-2021-64-407-434. (In Russ).

Информация об авторах

Никольский Николай Викторович, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, младший научный сотрудник, nikolsky.geo@gmail.com.

Артамонов Юрий Владимирович, доктор географических наук, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, ведущий научный сотрудник, artam-ant@yandex.ru.

Скрипалева Елена Александровна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, старший научный сотрудник, sea-ant@yandex.ru.

Information about authors

Nikolskii Nikolai Viktorovich, Department of Oceanography, FSBSI FRC Marine Hydrophysical Institute of RAS, Junior Researcher.

Artamonov Yuri Vladimirovich, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Department of Oceanography, Marine Hydrophysical Institute of RAS, Leading Researcher.

Skripaleva Elena Alexandrovna, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Department of Oceanography, Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Senior Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята в печать 15.05.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted 15.05.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 311—327.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):311—327.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья
УДК 342:004.9
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-311-327

Геоинформационное обеспечение упреждающего управления административной практикой

***Вячеслав Георгиевич Бурлов¹, Анатолий Витальевич Переспелов¹,
Алексей Юрьевич Миронов¹, Анна Юрьевна Миронова²***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, wakepolarbear@gmail.com

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В целях повышения полноты, достоверности и оперативности выявления и устранения причин экологических и техногенных катастроф рассмотрен синтез геоинформационной системы упреждающего управления замкнутым циклом административной практики, отягощенной конфликтом сторон и дефицитом ресурсов. Исходя из закона сохранения целостности объекта, рекомендован критерий эффективности административной практики путем совместного противодействия активности правонарушителей с помощью геомониторинговой (защитной) и геолокационной (обеспечивающей) подсистемами управления. Естественно-научным подходом синтезирована математическая модель результативного принятия процессуальных решений на стадиях административного процесса при ограниченных ресурсах. Для повышения рентабельности административной практики предложены системообразующие принципы геоинформационного управления.

Ключевые слова: геоинформационное управление, административная практика, закон сохранения целостности объекта, естественно-научный подход, структурно-функциональное моделирование, критерий эффективности, системообразующие принципы

Для цитирования: Бурлов В. Г., Переспелов А. В., Миронов А. Ю., Миронова А. Ю. Геоинформационное обеспечение упреждающего управления административной практикой // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 311—327. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-311-327.

Original article

Geoinformation support for proactive management of administrative practice

*Viacheslav G. Burlov¹, Anatoly V. Perespelov¹,
Aleksey Y. Mironov¹, Anna Y. Mironova²*

¹ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Summary. In order to improve the completeness, reliability and efficiency of identifying and eliminating the causes of environmental and man-made disasters, the synthesis of a geoinformation system for proactive management of a closed cycle of administrative practice burdened by the conflict of parties and the shortage of resources is considered. Based on the law of preserving the object integrity, it is recommended to use the criterion for the effectiveness of administrative practice by jointly countering the activity of offenders with geomonitoring (protective) and geolocation (providing) management subsystems. A mathematical model of effective procedural decision-making at the stages of administrative process with limited resources has been synthesized by a natural-scientific approach. An analytical dependence is determined, that integrates the functioning regularities of geomonitoring, control-supervisory and geolocation components of the management system at the administrative practice stages. When concretizing it, the possibility of representing administrative production by Poisson transitions of the affairs flow about administrative offenses between the states of the administrative process stages in a continuous Markov chain is used. Through modeling a Markov chain by the Kolmogorov-Chapman's equations system the criterion of preemptive management existence in the production cycle is revealed, allowing under proper efficiency of administrative practice to optimize the intensity of identification and neutralization of threats to ensure a reasonable time in the protective, target or providing management subsystems. The structure and functionality of probabilistic transitions of the affairs flow about administrative offenses, including management procedures, in a Markov chain of production stages are created by their network modelling based on accumulated observations of administrative statistics. To increase the profitability of administrative practice, the system-forming principles of geoinformation management are proposed.

Keywords: geoinformation management, administrative practice, law of preserving the object integrity, natural-science approach, structural-functional modeling, efficiency criterion, system-forming principles

For citation: Burlov V. G., Perespelov A. V., Mironov A. Y., Mironova A. Y. Geoinformation support for proactive management of administrative practice. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):311—327. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-311-327.

Введение

Административная практика — это деятельность уполномоченных лиц и органов исполнительной власти по исполнению административного законодательства РФ и регионов. Ее предназначение состоит в профилактике общественной опасности правонарушений и сопутствующего ущерба.

За 30 последних лет выявление административных нарушений увеличилось в восемь раз, до 240 миллионов в год [1]. Однако на фоне разрастания объемов административной практики множатся выгорания массивов леса и застройки, промышленные аварии, загрязнение территорий и водоемов, природные катаклизмы,

наводнения. Из них 90 % вызваны латентными правонарушениями юридических и физических лиц. Признаки таких правонарушений содержат пространственно-координатное отражение в геопространстве социума. Но их очаги возникают в случайных местах, территориально распределены, замаскированы особенностями ландшафта или действиями правонарушителей.

Узаконенные способы обнаружения правонарушений основаны на фотовидеофиксации, сообщениях граждан, непосредственном выявлении правоохранителями, при этом случайно выявляются спектрально-пространственные признаки, относящиеся к 38 % статей Особенной части Кодекса РФ об административных правонарушениях. Административно наказуемые деяния пространственного характера плохо распознаются непосредственно без применения геоинформационного мониторинга, поэтому именно они и составляют большую часть латентной половины административных правонарушений, пока не создадут значительный ущерб.

Так, последние три года наблюдается трехкратный всплеск пожаров от неосторожного обращения с огнем. Инфракрасное излучение и дым от очагов можно фиксировать в высоком разрешении дистанционным зондированием с летательных аппаратов. Но пока по снимкам среднего разрешения лишь калибруются площади, охваченные или выжженные огнем [2].

Карательно-фискальный механизм административной практики нацелен на компенсацию штрафами ущерба от оконченных правонарушений [3]. При этом, четверть наказаний не исполняется. Около 40 % стоимости штрафов не уплачивается. Причина кроется в уклонении недобросовестных правонарушителей от участия в административном процессе. Их розыск обременителен без применения геолокации и используется редко для привлечения или принуждения.

В свете охранительной (риск-ориентированной) направленности и принципа оперативности административной реформы особую актуальность приобретает геоинформационное обеспечение упреждающего управления административной практикой на базе геоинформационной системы (ГИС).

Картографическое отображение мест нанесения ущерба уже реализовано в десятках таких ведомственных и корпоративных порталов, как: «Каскад», «Бриз», «КосмоПлан» и «Карта пожаров» МЧС России, ИСДМ и «Леса России» Рослесхоза, «Деметра» Россельхознадзора, ГИС мониторинга ООПТ Минприроды, ЛесЕГАИС ФГКУ «Рослесинфорг», «Оперативный мониторинг судоходства» ФГУП «Атомфлот». Общедоступны подсистема FIRMS отражения на порталах FIRMS FIRE MAP, NASA's WORLDVIEW, GFMS верховых и сильных низовых точек горения, веб-сервис Global Forest Watch анализа деградации лесов от вырубок, заболачивания, болезней. Все они берут исходную геоинформацию NASA из общедоступного архива Центра хранения Геологической службы США через 5—10 часов после съемки радиометрами MODIS, VIIRS, OLI в среднем разрешении 1000, 750, 30 метров соответственно [4]. Подобные разрешения и задержка результатов дистанционного зондирования обуславливают отражение на карте только значительных площадей ущерба от правонарушений. К тому моменту их устранение становится уже невозможным без специализированных подразделений, техники, средств и методов. Профилактическое выявление географических

координат признаков правонарушений нуждается в геоинформации высокого и сверхвысокого разрешения от отечественного геоинформационного мониторинга. Получение такой геоинформации весьма затратно [5]. Для полного, достоверного и оперативного установления пространственных правонарушений требуется обеспечение правоохранителей географическими координатами признаков правонарушений по результатам геоинформационного мониторинга (рис. 1).

Вынесение и исполнение постановлений и определений по делам о пространственных правонарушениях не выполняется без инновационных возможностей оперативного привлечения или принуждения правонарушителей к процедурам административного процесса. Для установления географических координат функционирования их мобильных телефонов, гаджетов, личного автотранспорта уже существует набор технологий геолокации у операторов сотовой связи, Интернет-провайдеров, региональных центров системы экстренного реагирования при авариях «ЭРА-ГЛОНАСС». Но обеспечение оперативно-разыскной деятельности конфиденциальными геоданными о местоположении искомого абонента требует расчета интенсивности применения законодательно оформленного регламента геолокации.

Новизна и достоверность настоящей работы определяется созданием адекватной математической модели принятия решений для ГИС управления административной практикой на основе базовых законов мироустройства. На основе указанной модели возможно определить системообразующий критерий профилактики и упреждающего пресечения правонарушений пространственного характера.



Рис. 1. Вклад геомониторинга и геолокации в управление административной практикой.

Fig. 1. Contribution of geomonitoring and geolocation to administrative practice management.

Следовательно, адекватным моделированием системного применения инноваций геоинформатики в производственном цикле по делам о пространственных правонарушениях математически решается важная научно-практическая проблема полноты, достоверности и оперативности административной практики.

Постановка задачи синтеза модели принятия решений в ГИС

Административная практика составляет сложную организационно-техническую систему. В ней правоохранители и правонарушители часто противодействуют друг другу с использованием наличных ресурсов, как представлено на рис. 2.

Согласно теории функциональных систем П.К. Анохина [6], в ГИС упреждающего управления административной практикой следует воспроизвести основополагающие конструкции психофизиологических механизмов деятельности должностного лица, принимающего решение по поводу пространственного правонарушения (ЛПР):

- осуществлять противодействие на основе модели;
- формировать решение проблем в последовательности «возбуждение — распознавание — реакция на обстановку»;
- упреждать ущерб за счет формализованного критерия нарождающейся проблемы.

В качестве количественного показателя эффективности управления целесообразно использовать цифровой эквивалент принципа оперативности административной практики. В роли его аналога следует рассмотреть проблему полноты, достоверности и оперативности административного процесса, оперативно устраненных с помощью ГИС управления.

Для моделирования системная инженерия предлагает методы анализа или синтеза. Анализом выявляются свойства системы по заданной структуре и

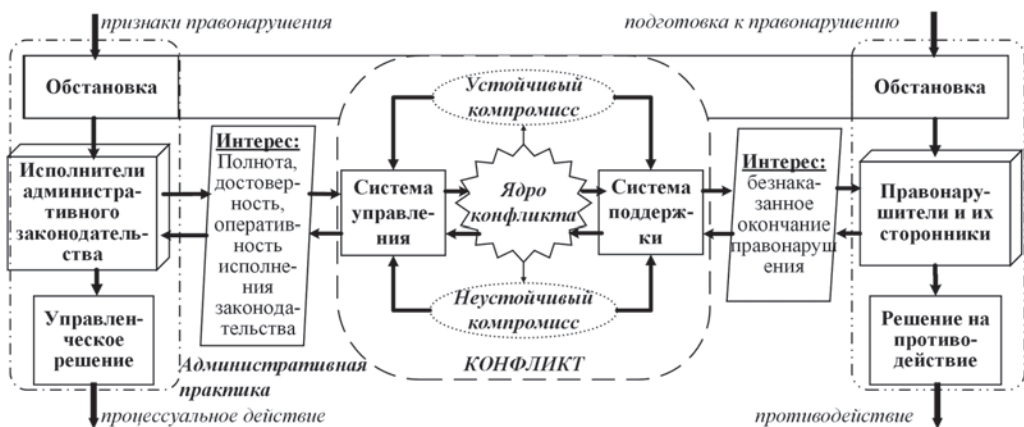


Рис. 2. Разрешение конфликта сторон в административной практике.

Fig. 2. Resolution of the conflict of parties in administrative practice.

функциональности управления. На основе итерационного решения прямой задачи из альтернатив выбирается структура и функциональность управляющего воздействия, придающего лучшую эффективность управляемому объекту. Несмотря на широкий выбор и глубокую проработанность методов анализа, подбор затягивает определение допустимого воздействия и малопригоден для превентивного управления. Напротив, синтез генерирует структуру и функциональность управления под заранее заданные свойства системы. Несмотря на возможность неустойчивости и множественных решений, реализация обратной задачи позволяет упредить структуру и функциональность управляющего воздействия под ожидаемую эффективность управляемого объекта.

Таким образом, для структурно-функционального синтеза модели принятия решений в ГИС управления административной практикой необходимо решить следующие подзадачи:

- 1) определиться с составом и критерием эффективности ГИС управления при конфликте сторон в административном процессе;
- 2) создать адекватную модель принятия решений в ГИС управления при ограниченности ресурсов;
- 3) обеспечить рентабельность эксплуатации ГИС управления.

Состав и критерий эффективности ГИС управления административной практикой

Административная практика осуществляется в текущей обстановке при взаимодействии участников со стороны правоохранителей и правонарушителей. Из-за стремления к собственным и ролевым интересам участники постепенно группируются на противоположных сторонах административного правоотношения. Идет борьба за преобладание воспринятых групповых целей до достижения конфликтом устойчивого или неустойчивого равновесия между исполняющими административное законодательство (должностным лицом исполнительного органа власти, прокурором, судьей) и противодействующими им (правонарушителями, представителями, свидетелями, защитниками). Следуя динамике конфликта, приходится актуализировать состав, структуру и функциональность ГИС управления на протяжении всего административного процесса.

При противодействии противнику конфликтующая сторона добивается достижения своих целей за счет гибридного применения трех базовых методов управления: целевого и обертывающих его защитного и обеспечивающего. Все они реализуются в ГИС управления одноименными базовыми подсистемами [7]. Из рис. 3 видно, что эффект противодействия будет возрастать от окутывания ГИС слоями из дополнительных защитной и обеспечивающей подсистем. Однако из-за целевого и содержательного подобию функциональность последних целесообразно включить в базовые защитную и обеспечивающую подсистемы управления.

Целевая подсистема на стороне конфликта обеспечивает контрольно-надзорными способами динамичное выполнение задач управляемого объекта по его предназначению. Так, правонарушители стремятся к незаметному поиску средств,

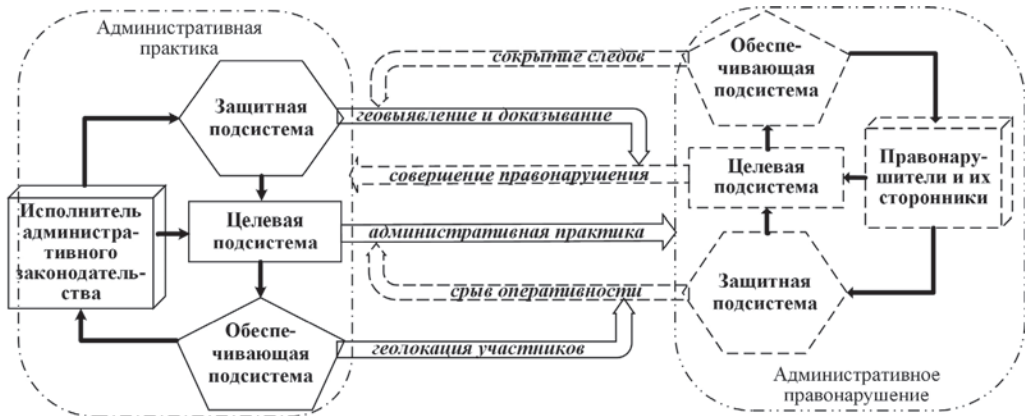


Рис. 3. Состав ГИС управления административной практикой при конфликте сторон.

Fig. 3. Composition of management GIS of administrative practice in conflict of parties.

орудий, соучастников, к безнаказанной подготовке и окончанию правонарушения. Исполнители административного законодательства нацелены на полное, достоверное и оперативное пресечение административного правонарушения и наказание виновных. Целевая подсистема управления контролирует и надзирает за надлежащей поступательностью и результативностью административного процесса. Наступательности и активному противодействию недобросовестных участников противостоят защитная и обеспечивающая подсистемы управления.

Для защиты собственного целевого процесса всегда эффективно упреждающее контрнаступление на целевую деятельность противника. Временной промежуток на подготовку и совершение пространственного правонарушения обычно сопровождается маскированием признаков и срывом процессов выявления. Ход правонарушения пространственного характера превентивно выявляется и доказывается геоинформационным мониторингом признаков. Защитная подсистема господствует в ГИС управления административной практикой на стадии возбуждения дел. Ее роль на стадиях рассмотрения дел и исполнения наказаний шаг за шагом угасает, в том числе и от обеспечивающей активности противника.

Диалектическое противоречие разнонаправленных защитной и целевой подсистем управления, обремененное защитой противника, устраняется обеспечивающей подсистемой управления. В ее рамках правонарушители пытаются скрыть свои идентифицирующие следы и связи с правонарушением. С помощью геолокационных инноваций исполнители административного законодательства обнаруживают и привлекают к административной ответственности правонарушителей. Ломая защиту противника, обеспечивающая подсистема интегрирует достижения своего защитного и целевого управления и доминирует в успешном завершении административного процесса.

Эффективность ГИС управления административной практикой при конфликте сторон сводится к общесистемному критерию (1):

$$\sum_{j=1}^3 \left[\lambda_j \sum_{k=0, k \neq j-1}^3 P_{k0} \right] / \sum_{j=1}^3 \lambda_j \geq I^*, \quad (1)$$

где j, k — признак принадлежности к началу (0) административного процесса или его стадии (1—3): возбуждения (1), рассмотрения (2) дела о пространственном правонарушении, исполнения решения (3) по делу; λ_j — интенсивность появления проблем полноте, достоверности, оперативности на j -й стадии административной практики; P_{k0} — доля дел о пространственных правонарушениях с полно, достоверно и оперативно реализованным предназначением k -й стадии административной практики; I^* — уровень эффективности управления административной практикой, количественно определенный долей оперативно устранившихся проблем.

Адекватная модель принятия решений в ГИС управления

Адекватность принятия решений в ГИС управления административной практикой достигается следованием формальной аксиоматической логике, исходя из закона сохранения целостности объекта. Дедуктивное осознание существенных связей на рис. 4 и индуктивное познание системообразующей закономерности на рис. 5 осуществляются естественно-научным подходом в свете свойств объективности, изменчивости, целостности на методологическом, методическом, технологическом уровнях [8].

В результате познается векторно-матричный агрегат (2) математической модели принятия решений в ГИС управления административной практикой:

$$dP/dt = f(T_{\exists}, \Delta t_{\text{ипп}}, \Delta t_{\text{ипп}}, \Delta t_{\text{ипп}}, \xi, \mu, \tau, P), \quad (2)$$

где P — долевое распределение дел о пространственных правонарушениях на стадиях административной практики по базовым состояниям (в исходном состоянии, целевом состоянии, идентификации, нейтрализации); $f()$ — функционал, отображающий в грядущее изменение текущее распределение дел по базовым состояниям под воздействием процессов принятия решений на стадиях административной практики; $T_{\exists}, \Delta t_{\text{ипп}}, \Delta t_{\text{ипп}}, \Delta t_{\text{ипп}}$ — среднестатистический период соответственно Целевого процесса, Появления проблем, их Идентификации, их Нейтрализации на стадиях административной практики; ξ, μ, τ — частота срывов в исходные состояния соответственно Целевого процесса, Идентификации и Нейтрализации проблем полноте, достоверности, оперативности стадий административной практики.

Административная практика при конфликте сторон и ограниченности ресурсов пребывает в условиях стохастической неопределенности. Влияние значительного количества объективных и субъективных факторов делает процессы принятия решений случайными во времени, а их вероятностные характеристики — неопределенно изменяющимися. Однако для статистической оценки работы исполнителей административного законодательства автоматизированным учетом административной практики фиксируются по каждому делу время начала и окончания процессуальных процедур. Среднестатистический период прохождения

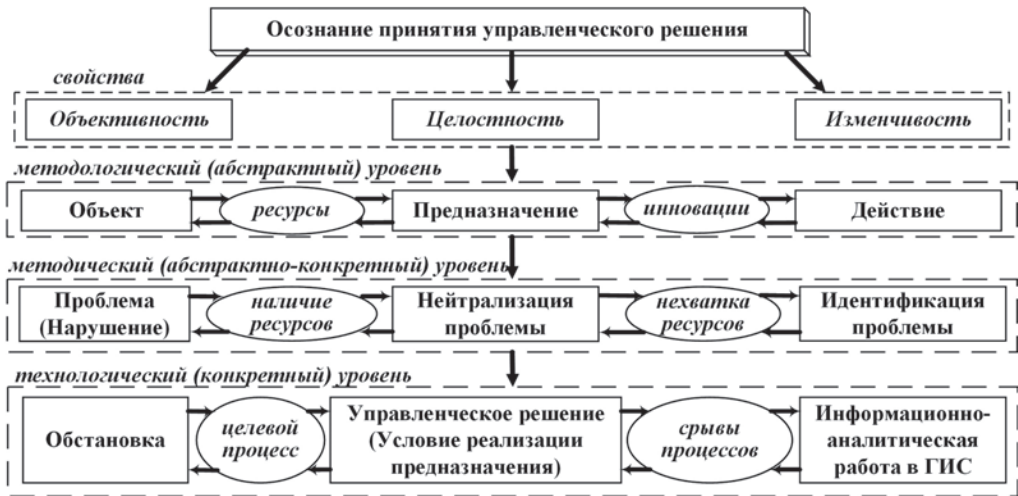


Рис. 4. Осознание принятия управленческого решения естественно-научным подходом.

Fig. 4. Awareness of managerial decision-making with a natural-scientific approach.

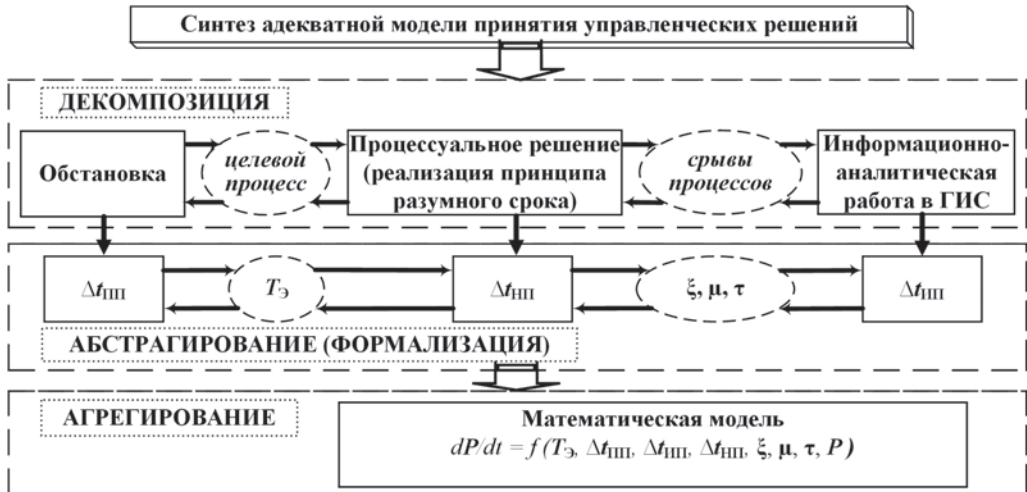


Рис. 5. Синтез модели принятия решений в ГИС управления административной практикой.

Fig. 5. Decision-making model synthesis in management GIS of administrative practice.

дел о пространственных правонарушениях на конвейере административной практики через комплекс процессуальных процедур определяет сложившуюся продолжительность формируемого ими процесса. Текущая оценка на стадиях административной практики периодов Целевого процесса и Появления проблем

предоставляет исходные данные для модели (2) к прогнозу потребных длительностей Идентификации и Нейтрализации по нормативной эффективности в ближайшем будущем. Значит, процессы принятия решений в ГИС управления административной практикой носят марковский характер в непрерывном времени.

Административные дела проходят процедуру процессов принятия решений последовательно, друг за другом, поодиночке, в случайные моменты времени. Нет никаких предпосылок для их группировки. То есть, продвижение потоков дел о пространственных правонарушениях можно считать ординарным. Следовательно, марковские и ординарные процессы принятия решений в ГИС управления административной практикой являются пуассоновскими. Тогда структура системы принятия решений при геоинформационном управлении моделируется непрерывной цепью Маркова [9].

На рис. 6 показано, как базовые функциональности i -й стадии административной практики увязаны определяющими их динамику интенсивностями Целевого процесса $\zeta_i = 1/T_{\zeta_i}$, Появления Проблем $\lambda_i = 1/\Delta t_{ппп}$, их Идентификации $\nu_i = 1/\Delta t_{ипп}$, их Нейтрализации $\omega_i = 1/\Delta t_{нпп}$ и частотами срывов Целевого процесса ξ_i , Идентификации μ_i и Нейтрализации τ_i .

Рис. 7 представляет непрерывную цепь Маркова в виде размеченного графа состояний.

Моделирование непрерывной марковской цепью позволяет отслеживать во времени распределение дел о пространственных правонарушениях по базовым состояниям стадий административной практики: по исходному P_{00} , по целевому P_{i0} , по идентификации P_{i1} и нейтрализации P_{i2} проблем, где $i = 1$ на стадии возбуждения дела, $i = 2$ на стадии рассмотрения дела, $i = 3$ на стадии исполнения решения по делу.

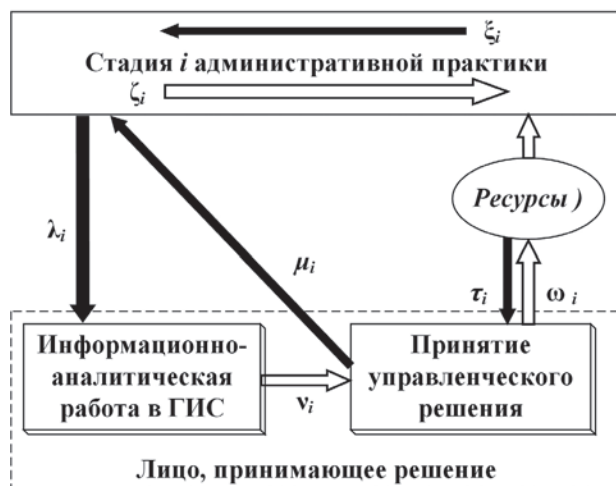


Рис. 6. Схема функциональностей i -й стадии административной практики.

Fig. 6. Functionalities scheme of i -th administrative practice stage.

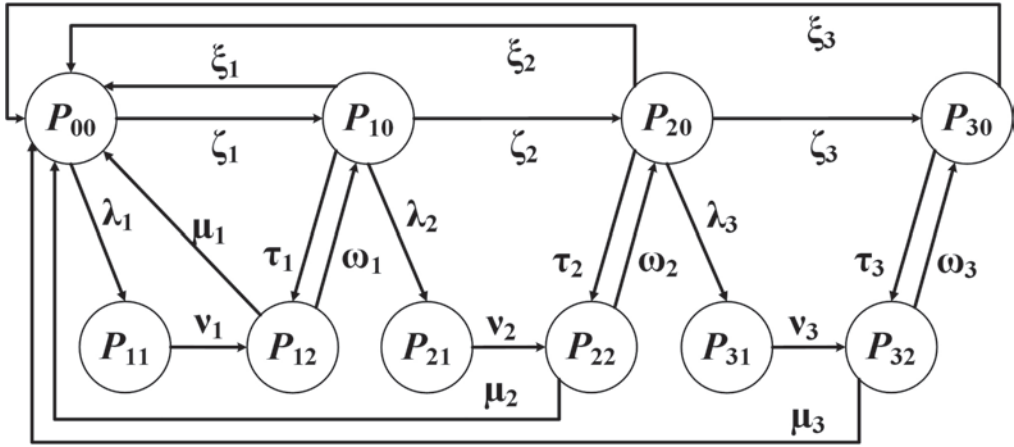


Рис. 7. Граф состояний административной практики.

Fig. 7. States graph of administrative practice.

В соответствии с графом состояний административной практики по поводу пространственных правонарушений векторно-матричный агрегат (2) конкретизируется векторно-матричным дифференциальным уравнением Колмогорова—Чепмена (3) с ограничением $AP = 1$:

$$\frac{dP(t)}{dt} = f(t)P(t), \tag{3}$$

где $A = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ — вектор-строка единиц;

$$P(t) = [P_{00}(t) \ P_{10}(t) \ P_{11}(t) \ P_{12}(t) \ P_{20}(t) \ P_{21}(t) \ P_{22}(t) \ P_{30}(t) \ P_{31}(t) \ P_{32}(t)]^T;$$

$$f(t) = \begin{bmatrix} -[\zeta_1 + \lambda_1] & \xi_1 & 0 & \mu_1 & \xi_2 & 0 & \mu_2 & \xi_3 & 0 & \mu_3 \\ \zeta_1 & -[\xi_1 + \tau_1 + \zeta_2 + \lambda_2] & 0 & \omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & -v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_1 & v_1 & -[\mu_1 + \omega_1] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \zeta_2 & 0 & 0 & -[\xi_2 + \tau_2 + \zeta_3 + \lambda_3] & 0 & \omega_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & -v_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_2 & v_2 & -[\mu_2 + \omega_2] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \zeta_3 & 0 & 0 & -[\xi_3 + \tau_3] & 0 & \omega_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & -v_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_3 & v_3 & -[\mu_3 + \omega_3] \end{bmatrix}$$

С течением времени пуассоновские процессы самопроизвольно стремятся к предельному стационарному режиму. Через длительный промежуток $dP/dt = 0$ и дифференциальное уравнение Колмогорова—Чепмена (3) с учетом ограничения превращается в векторно-матричное неоднородное линейное алгебраическое уравнение (4):

$$C = FP \Rightarrow P = F^{-1}C, \quad (4)$$

где $C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$;

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \zeta_1 - [\xi_1 + \tau_1 + \zeta_2 + \lambda_2] & 0 & \omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & -v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_1 & v_1 - [\mu_1 + \omega_1] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \zeta_2 & 0 & 0 & -[\xi_2 + \tau_2 + \zeta_3 + \lambda_3] & 0 & \omega_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & -v_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_2 & v_2 - [\mu_2 + \omega_2] & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \zeta_3 & 0 & 0 & -[\xi_3 + \tau_3] & 0 & \omega_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & -v_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_3 & v_3 & -[\mu_3 + \omega_3] \end{bmatrix}$$

Для наполнения матрицы F среднестатистические периоды Целевого Процесса, Появления Проблем, их Идентификации и Нейтрализации на стадиях административной практики устанавливаются с помощью сетевого моделирования из процессуальных процедур. Процессам принятия решений в ГИС управления административной практикой свойственна неравномерная самоорганизация. Как только неустойчивое равновесие склоняет процесс к потере функциональности, так появляется необходимость обновления структуры сетевой модели на более эффективную. До этого на поддержание функциональности в устойчивом равновесии при изменениях Обстановки достаточно параметрической оптимизации критического пути.

В условиях ограниченности ресурсов частоты срывов определяются долями интенсивности Целевого Процесса, Идентификации и Нейтрализации Проблем, осуществленными с нарушением принципа оперативности.

Численным решением уравнения (4), например, с помощью метода Гаусса—Зейделя или Гаусса—Жордана, получается вектор-столбец долевого распределения дел о пространственных правонарушениях по базовым состояниям стадий административной практики. Его элементы оценивают для заранее заданной эффективности управления через критерий (1) достаточность интенсивностей Идентификации и Нейтрализации на стадиях административной практики в ближайшем будущем. По Идентификациям определяются потребная интенсивность, структура и функциональность геоинформационного мониторинга и геолокации.

Обеспечение рентабельности ГИС управления административной практикой

Рентабельность ГИС управления целесообразно обеспечить, исходя из максимального взаимодействия с ведомственными учетами административной практики, с поставщиками геоинформации, с государственными информационными системами, автоматизированными системами ведомств, государственных и муниципальных уруг [10].

Сетевое моделирование процессов принятия решений в ГИС управления административной практикой требует полной и достоверной фиксации при учете административной практики времени начала и конца процессуальных процедур по каждому делу о пространственном правонарушении. Сопутствующее дополнение реквизитами модернизированного учета административной практики на базе централизованного модуля «Административная практика» СООП ИСОД МВД России будет позитивно воспринято правоохранителями при обязательности централизованного ведения в нем дел всеми исполнителями административного законодательства по подведомственности и территориальности с возможностью печати порождаемых протоколов, определений, постановлений.

Функционально-логистическая цепочка на рис. 8 применения геоинформатики требует от ЛПР жесткого регулирования.

В Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы» (АО «РКС») Госкорпорации «Роскосмос» или в дочернее АО «Терра Тех» из ГИС управления задаются с договорной интенсивностью целеуказания ЛПР. По ним сканеры и радиометры спутника или БПЛА фиксируют в высоком или сверхвысоком разрешении растровые слои заданных участков местности. После передачи в НЦ ОМЗ АО «РКС» растры подвергаются первичному очищению за счет радиометрической, геометрической и атмосферной коррекции, увеличения контраста, векторизации. Согласно договору, базовые информационные продукты первичной обработки из НЦ ОМЗ АО «РКС» или АО «Терра Тех» с расчетной интенсивностью передаются в ГИС управления. Здесь они тематически исследуются на предмет выявления признаков пространственных правонарушений путем фотограмметрической обработки, спектральных преобразований, пиксельных и объектно-ориентированных классификации и дешифрования [11]. В географических координатах признаков правонарушения ЛПР с расчетной интенсивностью поручает правоохранителю по территориальности производство неотложных процессуальных действий. Результаты обработки



Рис. 8. Функциональная логистика применения геоинформатики в управлении.

Fig. 8. States graph of the production cycle on affairs about offenses.

закладываются в базу геоданных на архивное хранение для последующего специализированного представления и запрашиваемого воспроизводства.

По аналогии с геоинформированием из НЦ ОМЗ Центр глобального мониторинга АО «РКС» способен по договорным заявкам ЛПР из ГИС управления обеспечивать геолокацию транспортных средств участников административного процесса, операторы сотовой связи — геолокацию их мобильных телефонов, Интернет-провайдеры — геолокацию их гаджетов.

Следовательно, источники, регламенты, объемы, формы, диапазоны точности и интенсивности снабжения геоинформацией от геоинформационного мониторинга и геолокации должны прогнозироваться ЛПР под алгоритмы и производительность ГИС заблаговременно, на конкурсной основе, исходя из возможностей специализированных поставщиков и наличных ресурсов.

Программно-техническое видение ГИС управления подсказывает экономическую необходимость централизации автоматизированного ведения и геоинформационного обеспечения административной практики. Для этого следует организовать итерационное присоединение исполнителей административного законодательства к ЦОД информационного центра территориального органа МВД России на региональном уровне, включенного в Интегрированную мультисервисную телекоммуникационную сеть. Совместно используемую ГИС управления целесообразно обеспечить:

- единым хранилищем геоданных (в ЦОД ФКУ «ГИАЦ МВД России»), типовой автоматизацией документального сопровождения административной практики;
- единым центром (в ДИТСиЗИ МВД России) государственного заказа геоинформационного мониторинга и геолокации;
- единым центром (в ГУОООП МВД России) регламентации электронного взаимодействия по ведению и использованию геоданных административной практики.

Вертикаль централизации заказа, хранения и предоставления геоданных о пространственных правонарушениях надлежит скрепить регламентными потоками сбора заявок, ведения и использования геоданных через региональные телекоммуникации.

Создание ГИС управления административной практикой в качестве механизма реализации принципа оперативности разумно закрепить частью 2 статьи 1.10 Процессуального кодекса РФ об административных правонарушениях. Это мотивирует федеральных и региональных исполнителей административного законодательства к согласованию в межведомственном приказе регламентов подведомственной работы с ГИС.

Предложив геоинформационное обеспечение упреждающего управления административной практикой, полезно обозначить перспективу развития ГИС управления. От ее совершенствования ожидается адекватная интерпретация расширяющегося круга внешних геоданных и оперативного извлечения из них знаний, которые могут использоваться для повышения эффективности управления. То есть, ГИС управления административной практикой будет все больше обладать признаками искусственного интеллекта. Вероятно, ее чертами станут большие геоданные (big geodata) и адаптивное саморазвитие [12].

В силу межведомственного интереса ГИС управления административной практикой претендует на правовой статус государственной. Разумный баланс централизации хранения и ведения геоданных о пространственных правонарушениях и местных особенностей их потребности и использования ведет к дозированной открытости региональным пользователям исходного кода функциональных блоков математического обеспечения ГИС управления. Преимущества свободного программного обеспечения (оперативность внедрения, сокращение стоимости и ошибок, прозрачность «закладок») и опыт его эксплуатации способны привести дополнительную динамику функциональности и защищенности ГИС управления административной практикой.

Выводы

Таким образом, эффективность геоинформационного управления согласно критерию (1) оценивается долей проблем полноты, достоверности и оперативности административной практики, идентифицированных и нейтрализованных с помощью геомониторинговой и геолокационной подсистем управления. В виде адекватной математической модели получен системообразующий критерий (4) принятия решений в ГИС управления. Сетевое моделирование устанавливает соответствие периода Целевого Процесса, Появления Проблем, его Идентификации и Нейтрализации с их структурой и функциональностью на стадиях административной практики. Для текущих Целевых процессов и Появлений Проблем численное решение уравнения (4) оптимизирует Идентификации и Нейтрализации под заданную эффективность управления административной практикой. В результате устанавливается необходимая интенсивность, структура и функциональность геоинформационного мониторинга и геолокации.

Рентабельность эксплуатации ГИС управления административной практикой ожидается от следования таким принципам ее организации, как:

- 1) обязательность подключения каждого исполнителя административного законодательства в нормативно установленном порядке;
- 2) открытость региональным пользователям для настройки и использования программного обеспечения в соответствии с ведомственным регламентом;
- 3) централизация заказа, хранения и предоставления геоданных, ведения и документального сопровождения административной практики;
- 4) информационное обеспечение со стороны государственных и ведомственных информационных систем;
- 5) межведомственное электронное взаимодействие по ведению и использованию геоданных административной практики;
- 6) перспективное внедрение элементов искусственного интеллекта, больших данных, адаптивного саморазвития и открытого кода.

Список литературы

1. Теоретические основы предупреждения преступности на современном этапе развития российского общества / под общ. ред. Р. В. Жубрина; Академия Генеральной прокуратуры РФ. М.: Проспект, 2020. 656 с.

2. Бондур В. Г., Мохов И. И., Воронова О. С., Ситнов С. А. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в Сибири и их последствий: особенности аномалий 2019 г. и тренды 20-летних изменений // Доклады наук о Земле. 2020. Т. 492. С. 370—375. doi: 10.1134/S1028334X20050049.
3. Лунеев В. В. Юридическая статистика / Институт государства и права РАН. М.: Норма: ИНФРА-М, 2017. 448 с.
4. Бондур В. Г., Воронова О. С., Черепанова Е. В., Цидилина М. Н., Зима А. Л. Пространственно-временной анализ многолетних лесных пожаров и выбросов газовых примесей и аэрозолей в России по спутниковым данным // Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. С. 1457—1469. doi: 10.1134/S0001433820120348.
5. Миклуш В. А., Татарникова Т. М. Дистанционный мониторинг нефтяных разливов в акватории порта средствами радиолокационных систем // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 81—92. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-81-92.
6. Лапкин М. М., Кирышин В. А., Козеевская Н. А. П. К. Анохин — создатель теории функциональной системы // Российский медико-биологический вестник им. академика И. П. Павлова. 2018. Т. 26. №1. С. 47—58. doi: 10.23888/PAVLOVJ201826147-58.
7. Матвеев А. В., Иванов М. В., Шевченко А. Б. Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС // Научно-технические ведомости СПбГПУ: информатика, телекоммуникации, управление. 2010. № 6. С. 91—95.
8. Mironov A. Y., Mironova A. Y., Burlov V. G. Prevention, Detection, and Proof of Offenses in Road and Bridge Construction Under the Management of Geoinformation System // Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. V. 141. P. 214—223. doi: 10.1007/978-3-030-67654-4_24.
9. Бурлов В. Г., Миронов А. Ю., Миронова А. Ю. Применение геоинформационной системы в профилактике, выявлении и доказывании административных правонарушений // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 126—146.
10. Колбанев М. О., Палкин И. И., Татарникова Т. М. О роли данных в цифровой экономике // Гидрометеорология и экология. 2020. № 59. С. 124—136. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-124-136.
11. Константинова А. М., Балашов И. В., Кашницкий А. В., Лупян Е. А., Мухажанов И. Д. Унифицированная технология дистанционного наблюдения за природными и антропогенными объектами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41—52. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52
12. Биденко С. И., Храмов И. С., Бенгерт А. А., Мучкаева И. С. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 508—524. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.

References

1. Zhubrin R. V. *Teoreticheskie osnovy preduprezhdeniya prestupnosti na sovremennom etape razvitiya rossijskogo obshchestva = Theoretical foundations of crime prevention at the present stage of development of Russian society*. Moscow: Prospekt, 2020: 656 p. (In Russ.).
2. Bondur V. G., Mokhov I. I., Voronova O. S., Sitnov S. A. Satellite monitoring of forest fires in Siberia and their consequences: features of anomalies in 2019 and trends of 20-year changes. *Doklady nauk o Zemle = Reports of Earth Sciences*. 2020, 492: 370—375. [In Russian]. doi: 10.1134/S1028334X20050049.
3. Luneev V. V. *Yuridicheskaya statistika = Juridistical statistics*. Moscow: INFRA-M, 2017: 448 p. (In Russ.).
4. Bondur V. G., Voronova O. S., Cherepanova E. V., Tsidilina M. N., Zima A. L. Spatio-temporal analysis of long-term forest fires and emissions of gas impurities and aerosols in Russia based on satellite data. *Izvestiya, Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020, 56: 1457—1469. [In Russian]. doi: 10.1134/S0001433820120348.
5. Miklush V. A., Tatarnikova T. M. Remote monitoring of oil spills in the port area by means of radar systems. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022, 66: 81—92. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-81-92.
6. Lapkin M. M., Kiryushin B. A., Kozeevskaya N. A. P. K. Anokhin is the founder of theory of functional systems. *Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2018; 26 (1): 47—58. [In Russian]. doi: 10.23888/PAVLOVJ201826147-58.

7. Matveev A. V., Ivanov M. V., Shevchenko A. B. Analytical model of the NPP fire safety management system. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU: informatika, telekommunikacii, upravlenie = Scientific and Technical bulletin of SPbPU: informatics, telecommunications, management*. 2010; (6): 91—95. (In Russ.).
8. Mironov A. Y., Mironova A. Y., Burlov V. G. Prevention, Detection, and Proof of Offenses in Road and Bridge Construction Under the Management of Geoinformation System. *Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021, 141: 214—223. doi: 10.1007/978-3-030-67654-4_24.
9. Burlov V. G., Mironov A. Y., Mironova A. Y. Application of geoinformation system in prevention, identification and evidence about administrative offenses. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2019, 57: 126—146. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-126-146.
10. Kolbanev M. O., Palkin I. I., Tatarnikova T. M. Geoinformation support for proactive management of administrative practice. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2020, 59: 124—136. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-124-136.
11. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitsky A. V., Lupyan E. A., Mukhazhanov I. D. Unified technology for remote monitoring of natural and anthropogenic objects. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021, 18 (4): 41—52. (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
12. Bidenko S. I., Khramov I. S., Bengert A. A., Muchkaeva I. S. Geoinformation procedure for assessing the regional situation on the basis of operational INS-analysis of hydrometeorological and environmental information (on the example of the Ob Bay). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022, 68: 508—524. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.

Сведения об авторах

Бурлов Вячеслав Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), burlovvg@mail.ru.

Переспелов Анатолий Витальевич, канд. техн. наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), aerespelov@gmail.com.

Миронов Алексей Юрьевич, ассистент кафедры информационных технологий и систем безопасности, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), wakerolarbear@gmail.com.

Миронова Анна Юрьевна, студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, milpandaaaa@gmail.com.

Information about authors

Burlov Vyacheslav Georgievich, Dr. Sci. (Tech.), professor, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Perespelov Anatoly Vitalievich, PhD (Tech. Sci), associate professor, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Mironov Aleksey Yurievich, assistant of the department of information technology and security systems, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Mironova Anna Yurievna, student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 21.12.2022

Принята к печати после доработки 10.05.2023

The article was received on 21.12.2022

The article was accepted after revision on 10.05.2023

УДК [556.535.5:629.5](091)(282.247.41)(262.81)

doi: 1033933/2713-3001-2023-71-328-334

История возникновения и становления зимних плаваний на Нижней Волге и в северной части Каспийского моря

Петр Иванович Бухарицин

Институт водных проблем РАН; Институт океанологии РАН, astrgo@mail.ru

Аннотация. Судходство на Нижней Волге и Каспийском море имеет давнюю историю. Уже к началу XVIII в. дельта Волги становится местом интенсивной перевалки товаров из реки в море и обратно. Мелководный участок Волги и тогда представлял собой наиболее сложную для судходства часть Волго-Каспийского водного пути. Значительные сгонно-нагонные колебания уровня воды создавали при этом дополнительные трудности. Еще больше проблем возникало при попытках осуществления зимних плаваний при наличии в реке и море ледяного покрова.

Ключевые слова: зимняя навигация, судходный канал, ледовая проводка, искусственный взлом льда.

Сложности судходства послужили причиной строительства в 1878—1882 гг. Волго-Каспийского морского судходного канала. Однако с появлением современных большегрузных, с большой осадкой, судов канал перестал удовлетворять все возрастающим требованиям судходства. Его совершенствование началось уже в первые годы Советской власти и продолжается до настоящего времени.

До начала 60-х годов XX в. попыток ледовых плаваний на участке Нижняя Волга — Северный Каспий не предпринималось. Рейдовые ледоколы «Волга», «Дон» работали в зимний период лишь в пределах акватории Астраханского речного порта. Морской же ледокол «Каспий» (порт приписки — Махачкала) обеспечивал безопасность работы мелких тюленебойных судов в акватории Северного Каспия в период зимнего промысла. Так как утлые суденышки заходили в сплоченные дрейфующие льды, их часто затирало льдом, были случаи их гибели (рис. 1).

Появление на Каспии судов смешанного плавания типа «река—море» дало возможность значительно сократить перевалки грузов в районе Астраханского морского рейда с морских судов на речные и наоборот. Сейчас по этому водному пути следуют как российские, так и зарубежные суда прикаспийских государств. За навигацию здесь проходят тысячи единиц флота. Значительно вырос и тоннаж судов и несудходных плавучих объектов (буровые платформы и др.).

До конца 70-х годов XX в. сроки навигации на Нижней Волге и Северном Каспии определялись периодом с момента окончания весеннего до окончания осеннего ледохода. Исключение составляли рыболовецкие суда управлений «Каспрыба» и «Каспрыбхолодфлот», которые в зимние месяцы осуществляли промысел



Рис. 1. Тюленебойное судно во льдах Северного Каспия (фото из архива автора).

кильки в незамерзающей южной части моря. С этой целью формировались караваны судов, которые с помощью ледоколов сопровождалась из Астрахани по каналу до кромки льдов, а обратно в Астрахань шли суда, которые возвращались с промысла.

Современный Волго-Каспийский канал представляет собой искусственное продолжение одного из основных рукавов дельты Волги — Бахтемира, имеет длину около 200 км и является главной судоходной артерией, связывающей речные пути бассейна Волги с портами Каспийского моря (рис. 2).

Осенью в конце навигации специализированная служба «Каспрейдморпуть» всю навигационную обстановку канала (летние навигационные буи, а также Астраханский Приемный плавмаяк) на зимний период снимала для ремонта и покраски. Вместо них в морской части канала выставлялись зимние буи, так называемые «сигары» (рис. 3).

Быстрый рост объема перевозок потребовал продления сроков навигации за счет эксплуатации флота в условиях зимнего плавания. Начиная с 1978 г., Астраханское управление морского флота «Каспар», пароходство «Волготанкер» и ряд других ведомств приступили к организации экспериментальных перевозок народнохозяйственных грузов из портов Каспийского моря в Астрахань в осенне-зимних условиях. Были предприняты попытки ледокольного плавания на участке Нижней Волги от Астрахани до Волгограда.

Однако судоводители столкнулись с серьезными проблемами. Суда, следовавшие за ледоколом, не имели ледового класса. Длина судов значительно больше длины ледокола, поэтому на крутых изгибах русла следовавшее за ледоколом судно «заклинивалось» в пробитом ледоколом канале. Застрявшее судно ледокол был вынужден выкалывать из ледяного плена, рискуя пробить льдиной тонкие борта

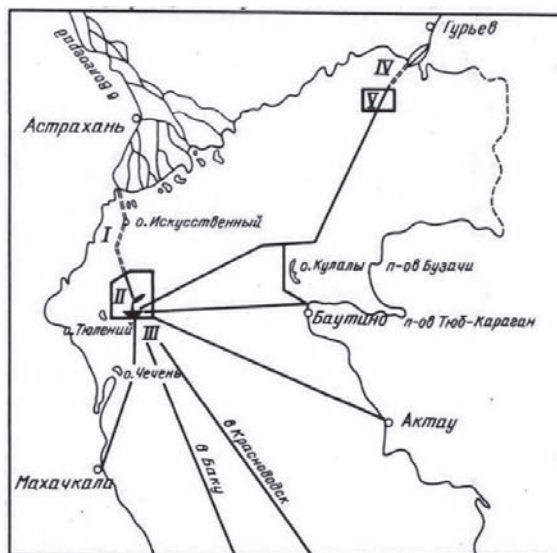


Рис. 2. Судходные трассы Северного Каспия:

- I — Волго-Каспийский морской судходный канал; II — Акватория Астраханского морского рейда;
- III — Астраханский Приемный плавмаяк; IV — Урало-Каспийский канал;
- V — Акватория Гурьевского морского рейда.



Рис. 3. Стамуха, образовавшаяся в ложе канала. На переднем плане «сигара» — зимний навигационный буй, обозначающий фарватер (фото: ФГБУ «АМП Каспийского моря»).



Рис. 4. Искусственный взлом льда в ВКМСК (фото из архива автора).

судна. Кроме того, в излучинах реки формируются так называемые зимние зажоры (заторы, сформировавшиеся из ледяного сала). Под воздействием ледокола такой затор приходил в движение, становился подвижным. Ледокол и судно в таких условиях становились неуправляемыми, что грозило аварией или катастрофой. У вышедших из таких ледовых объятий судов шпангоуты выпирали как ребра у исхудавшей лошади.

С целью ускорения естественных процессов очищения низовьев Волги и судоходного канала ото льда были предприняты попытки искусственного взлома ледяного покрова ледоколами. Предполагалось, что взломанный ледоколами лед течением будет выноситься в море, создавая условия для более раннего открытия навигации (рис. 4), однако на деле оказалось не так. Частые в этом регионе восточные и юго-восточные ветры (моряна) забивали битым льдом канал в его морской части. Лед набивался до дна в ложе канала и был непроходимым даже для мощных ледоколов. Идея с искусственным взломом льда также оказалась неэффективной.

Несмотря на явные преимущества, у классических ледоколов имеется существенный недостаток. Дело в том, что проделанный ими судоходный канал обычно бывает забит обломками льда, которые довольно быстро смерзаются, и всю работу приходится начинать заново.

Принципиально новое решение предложил инженер Московского речного пароходства Г. Я. Сербул, разработавший в 1970 г. ледокольную приставку, представляющую собой перевернутую баржу, в носовой части которой находится

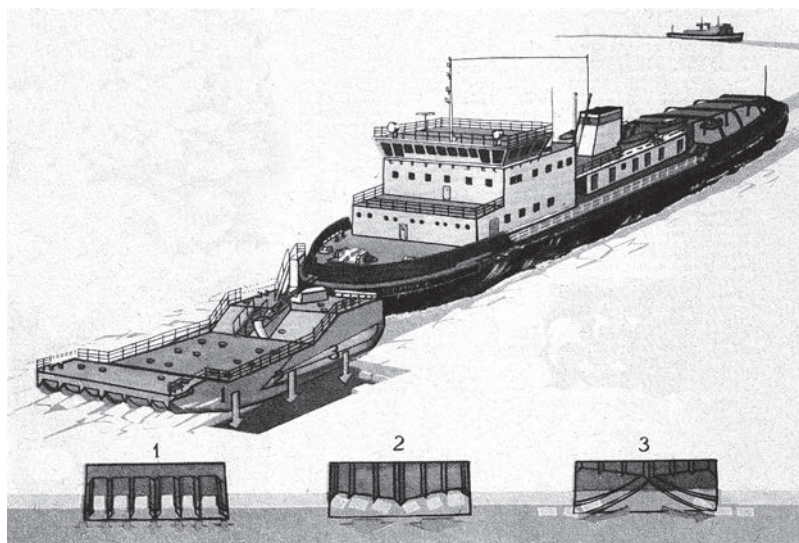


Рис. 5. Ледокольно-ледоочистительная приставка (ЛПП-18) работающая в паре с речным ледоколом.

Внизу, слева направо показана последовательность операций, выполняемых приставкой:
 1 — разрезание ледяного поля резами; 2 — продавливание льда корпусом приставки;
 3 — выталкивание обломков льда под кромки канала [2].

резец. Заполненная балластом, закрепленная перед любым достаточно мощным судном, приставка раскалывала лед, подминая его обломки и разводя их под края проделанного канала во льду. В 1976 г. сотрудники Горьковского института водного транспорта создали усовершенствованную ледокольно-ледоочистительную приставку ЛПП-18 (цифра в обозначении соответствует ширине проделываемого приставкой канала), предназначенную для работы с озерным буксиром-толкателем ОТ-2000. Испытания двух приставок (их назвали «Ледовая-1» и «Ледовая-2») на Горьковском и Куйбышевском водохранилищах оказались успешными. Судходный канал, проложенный с помощью этих приставок, был практически свободен ото льда (рис. 5).

К сожалению, и эта передовая технология не прижилась на Нижней Волге. Спустя годы автор обнаружил заброшенную приставку «Ледовая-3» на берегу, в дальнем закутке волжского затона. Дальнейшая судьба приставки неизвестна.

В 1980 г. со стапелей Астраханской судовой верфи им. С. М. Кирова было спущено на воду головное судно новой серии «Тюлень-1», предназначенного для добычи тюленей во льдах Северного Каспия. В отличие от существующих тюленебойных судов новое судно имеет усиленный «ледовый пояс», способный самостоятельно работать в сплоченных дрейфующих льдах и выдержать их натиск (рис. 6). В последующие годы было построено более десяти таких судов.

В настоящее время навигационную доступность портов Астрахань и Оля в ледовых условиях, в акваториях этих портов, а также на всем протяжении



Рис. 6. Тюленебное судно «Тюлень» на рейде порта Махачкалы (фото автора).

Волго-Каспийского морского судоходного канала и на Астраханском морском рейде (российская часть акватории Северного Каспия) обеспечивают три линейных речных, мелкосидящих ледокола финской постройки «Капитан Букаев», «Капитан Чечкин» и «Капитан Мицайк», принадлежащих Астраханскому филиалу ФГУП «Росморпорт» (рис. 7). Постоянно функционирует штаб ледокольных проводок в морских портах Астрахань и Оля.



Рис. 7. Караван судов в Волго-Каспийском морском судоходном канале под проводкой ледокола (фото: ФГБУ «АМП Каспийского моря»).

Сегодня с целью обеспечения безопасности мореплавания в период зимней навигации ФГБУ «Администрацией морских портов Каспийского моря» проводится работа по организации ледокольных проводок караванов судов, разрабатываются планы мероприятий, регулярно собираются совещания, на которых со специалистами заинтересованных организаций обсуждаются все текущие и проблемные вопросы судоходства.

Заключение

Следует отметить, что успех зимних навигаций зависит не только от того, как технически и теоретически готовы все службы и участники транспортного процесса к работе в суровых условиях, но и как налажено сотрудничество и координация задействованных в процессе людей, профессионалов отрасли, знатоков своего дела. Именно от них в большей степени полностью зависит бесперебойная работа морского транспорта на сложном судоходном участке Нижняя Волга — Северный Каспий.

Статья поступила 05.04.2023

Принята в печать 03.05.2023

The article was received on 05.04.2023

The article was accepted 03.05.2023

УДК 551.322:551.501

doi: 1033933/2713-3001-2023-71-335-343

О перспективных направлениях развития методов гидрометеорологических наблюдений за снежным и ледовым покровом

Валерий Юрьевич Цепелев

Российский Государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
РФ, v0010200@mail.ru

Аннотация. Техническое перевооружение гидрометеорологической службы не позволило достичь необходимой степени автоматизации наблюдательной сети, ее количественной и качественной оптимизации. Попытка преодолеть технологическое отставание не может быть реализована методом постоянной «гонки преследования». Только внедрение инновационных методов наблюдений, например, георадаров для мониторинга толщины снежного и ледового покрова, радиолокаторов бокового обзора для мониторинга ледовых полей в Арктике и других нетрадиционных подходов могут позволить гидрометеорологической службе занять достойное место в ряду мировых технологических лидеров.

Ключевые слова: гидрометеорологические наблюдения, георадар, радиолокатор бокового обзора, наблюдения за толщиной снега и льда, БПЛА, модернизация гидрометнаблюдений

Введение

В рамках исполнения «Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года», Правительством Российской Федерации была поставлена задача формирования высокоэффективной Гидрометеорологической службы, обеспечивающей выполнение функций по предоставлению потребителям своевременной и достоверной информации о состоянии окружающей среды на базе современных технологий. К настоящему времени пройдено уже более половины пути по модернизации и выведению на современный технологический уровень наблюдательной сети Росгидромета, но, к сожалению, по многим параметрам на сети все еще не удалось достичь необходимой степени автоматизации наблюдений. Ручные методы гидрометеорологических наблюдений, которые требуют большого количества персонала достаточно низкой квалификации, все еще доминируют над автоматическими на наблюдательной сети Росгидромета. В частности, наблюдения за снежным и ледовым покровом в массе своей проводятся ручными методами, что ограничивает возможности повышения качества гидрологических прогнозов (Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. РД 52.04.666-2005.2006).

Преодоление технологического отставания Росгидромета не может быть реализовано методом постоянной «гонки преследования», которая ведется как по причине хронического недофинансирования, так и постепенного вымывания из службы высококвалифицированного персонала. Только внедрение инновационных методов наблюдений могут позволить гидрометеорологической службе Российской Федерации занять достойное место в ряду мировых технологических

лидеров. Цель данной статьи состоит в рассмотрении технологических новинок, позволяющих нетрадиционными методами сократить расходы на проведение наблюдений за снежным и ледовым покровом и повысить их качество.

Иновационные методы наблюдений за снежным и ледовым покровом

Одной из основных проблем, с которыми сталкивается гидрометеорологическая служба РФ при обслуживании навигации по Северному Морскому Пути (СМП), является отсутствие отечественных космических аппаратов с радиолокатором бокового обзора (РЛО) на борту, который позволяет вести мониторинг ледового покрова Арктики вне зависимости от погодных условий. Поскольку в ближайшие годы не планируется запуск таких аппаратов в интересах Росгидромета, а интенсивность навигации по СМП возрастает год от года, то относительно дешевой и эффективной альтернативой спутниковой ледовой разведке могут служить беспилотные летательные аппараты (БПЛА). БПЛА, оперирующие с борта ледоколов, позволят осуществлять тактическую ледовую разведку по маршруту следования судов. Одним из успешных примеров разработки комплекса ледовой разведки на базе БПЛА с локатором бокового обзора является аппаратно-программный комплекс, разработанный в Московском Физико-Техническом Институте (МФТИ), который в настоящее время проходит полевые испытания. Комплекс позволяет получать с борта БПЛА многополяризационные радиолокационные изображения подстилающей поверхности в X и C-диапазонах (рис. 1). При этом полоса захвата изображения, получаемая с РЛО составляет 8—10 км при высоте полета БПЛА 2 км, а радиус проведения ледовой разведки составляет 100 км (рис. 2), что позволяет проводить мониторинг ледового покрова на расстоянии от ледокола, соответствующего его суточному переходу [1].



Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат с локатором бокового обзора на борту, предназначенный для получения радиолокационной картины льда на расстояниях до 100 км от места взлета. Комплекс эксплуатируется с борта ледокола.

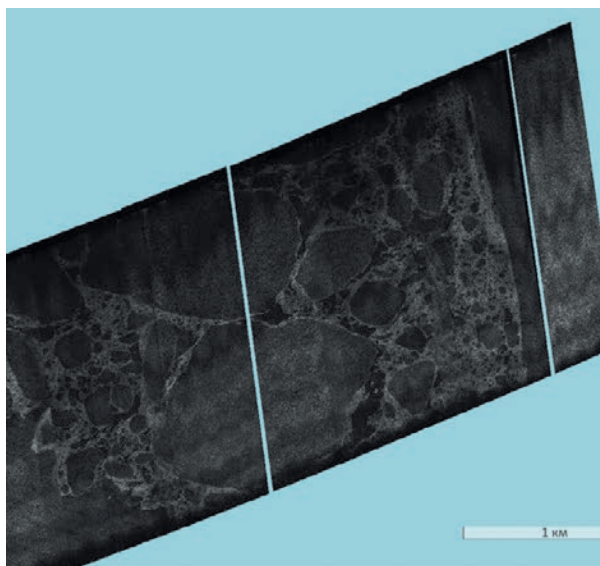


Рис. 2. Поляриметрические изображения ледового покрова Обской губы, получаемые в режиме реального времени с РЛС С-диапазона.

Специфика формирования ледовых полей не позволяет по отдельным радиолокационным изображениям однозначно определять тип льда и его толщину. В зависимости от «истории формирования» и географического расположения акватории ледяного поля разные типы льдов могут выглядеть одинаково на одном и том же изображении, а одинаковые типы льда по-разному на разных снимках. Для уточнения типа ледяного покрова необходимо знать его толщину. В настоящее время в оперативной практике ледовой разведки для определения толщины льда в основном используется либо ручное бурение морского льда на ограниченном количестве прибрежных гидрометеорологических станций, либо визуальным методом с борта судна. При этом первый способ позволяет получить информацию в редких точках Арктического бассейна, а второй — возможно использовать только в качестве посториорной информации для верификации толщины льда [2].

Для решения проблемы определения типа и толщины льда предложены различные методы. Так, в США разработана и многие годы используется методика измерения высоты поверхности ледового покрова со спутника при помощи радиолокационного альтиметра с точностью до 2—3 см. Знание высоты льда над поверхностью моря (геоида) в данной точке позволяет рассчитать толщину льда, исходя из его средней плотности. В связи с тем, что примерно 10 % массы льда находится над уровнем водной поверхности, а 90 % — под водой, то измерение высоты поверхности льда дает возможность рассчитать общую толщину льда. При этом чем толще лед, тем выше точность его измерения. При толщине льда 1 метр погрешность измерения толщины составит 20 %. Основным недостатком спутниковых измерений является их крайняя недостаточность. Пролет спутника

над одним и тем же районом акватории СМП происходит один раз в несколько суток, а измерения толщины льда осредняются для пятна диаметром в 50 километров, что абсолютно недостаточно для осуществления оперативного ледового прогноза [3].

В МФТИ предлагается оснащение БПЛА недорогим радиолокационным альтиметром, аналогичным тому, который используется для определения высоты полета летательного аппарата над поверхностью моря, что позволит получать в реальном режиме времени не только радиолокационную картину поверхности льда, но и определять его толщину по маршруту полета. Такой подход позволяет комплексно анализировать информацию о типе льда и его толщине, что в значительной степени решает проблему проведения оперативной тактической ледовой разведки в условиях Арктики.

Еще одним способом дистанционного измерения толщины льда является использование георадарных методов [4, 5]. Широкополосный георадар, работающий на низких частотах (50—250 МГц) и частотах 300—1300 МГц позволяет измерять морской лед толщиной от 30 см до 7 м, и потенциально до 10 метров. Испытания георадара на льдах Белого моря показали успешные результаты в случае установки прибора на борту БПЛА и зондирования льдов с высоты до 8 метров (рис. 3).

Использование георадарных методов направлено на получение информации в реальном режиме времени с борта БПЛА, но связано с трудностями, вызванными искажением информации, получаемой на соленых морских акваториях. В связи с этим наиболее эффективное использование георадарных технологий предлагается применять для измерения толщины льда на слабосоленых и пресных водоемах, где точность измерения составляет 1—3 сантиметра.

В настоящее время измерение толщины льда на морских гидрометеорологических станциях производится путем бурения лунок и проведения измерений при помощи линейки. Данные измерения высоко трудозатратны, производятся с низкой скоростью в ограниченном районе и не могут репрезентативно описывать толщину льда на больших водоемах. Ошибки измерения толщины льда зависят в первую очередь от того, насколько корректно выбраны точки для бурения лунок. Георадарные съемки, которые проводятся с высокой скоростью и на больших площадях, значительно эффективнее и дешевле ручных измерений.

Преимущества применения георадаров при производстве гидрометеорологических наблюдений:

- Данные передаются в реальном режиме времени.
- Точность измерения толщины пресного льда/снега составляет 2—4 см.
- Скорость движения при проведении зондирования составляет до 40 км/час.
- Информации о толщине льда/снега получается по выбранному маршруту произвольной длины.
- Существует возможность применения георадара в труднодоступных местах при размещении прибора на БПЛА.
- Значительно сокращаются трудозатраты и осуществляется автоматизация ручного труда.
- Повышается безопасность персонала при производстве измерений.



Рис. 3. Испытания георадара производства компании «Терразонд», установленного на борту БПЛА «Ирбис» в мае 2023 года на акватории Белого моря.

Для производства измерений в настоящее время уже доступны массово выпускаемые георадары-ледомеры типа «Пикор-лед», имеющие невысокую стоимость (около 300 тысяч рублей) и уже несколько лет используемые службами МЧС для обслуживания зимних ледовых переправ на реках и озерах (рис. 4 и 5). Использование георадара при производстве ледовых измерений пресноводных водоемов имеет несомненные преимущества перед ручным типом измерений, практикующимся на наблюдательной сети Росгидромета [8].

Еще одним направлением в области гидрометеорологических наблюдений, в котором внедрение георадарных технологий позволит нарастить как объем наблюдений, так и повысить их качество и удешевить производство измерений, являются снегомерные маршрутные съемки.

В настоящее время на более чем 500 станциях наблюдательной сети Росгидромета проводятся маршрутные снегомерные съемки (рис. 6). Наблюдения за снежным покровом по регламенту маршрутных снегосъемок осуществляются через каждые 10 дней в течение холодного периода года и каждые пять дней в период интенсивного снеготаяния. Длина маршрута, на котором проводится снегосъемка,



Рис. 4. Георадар «Пикор-лед», размещенный на судне на воздушной подушке МЧС.

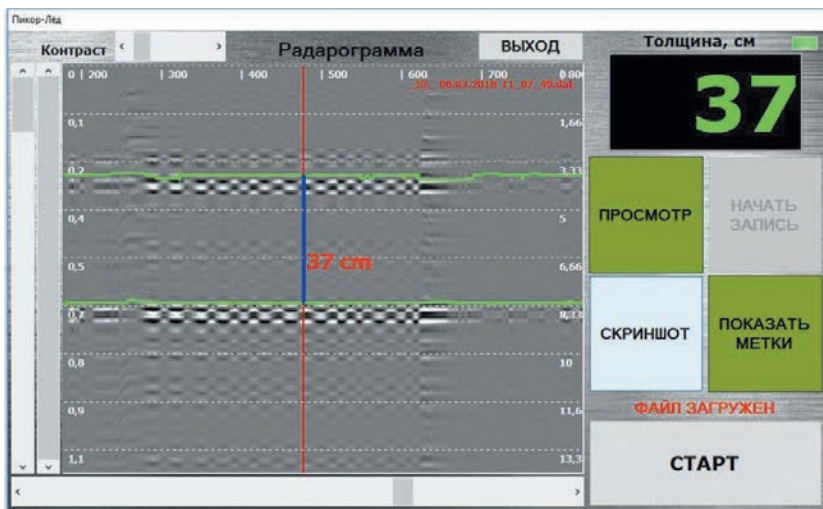


Рис. 5. Радарограмма толщины пресного льда, получаемая с георадара «Пикор-лед».

составляет 1 км в поле и 2 км в лесу. Каждые 10 метров в лесу или 20 метров в поле измеряются высота и плотность снежного покрова при помощи переносной снегомерной рейки и весовому снегомеру. Проблемы проведения маршрутных снегосъемок нарастают с каждым годом по мере старения личного состава Росгидромета, средний возраст которого по состоянию на 2022 год составляет



Рис. 6. Наблюдательная сеть Росгидромета, на которой проводятся маршрутные снегосьемки.

50 лет. Значительные физические трудозатраты, устаревшее ручное оборудование и низкая заработная плата персонала приводят к снижению качества и объема снегосьемок. Георадар позволяет проводить со снегохода с высокой скоростью непрерывные измерения толщины снежного покрова с точностью до 2—4 сантиметра и выявлять неоднородности в его плотности [7]. Измерение плотности снежного покрова только в ключевых точках маршрута позволит получать репрезентативную плотность снежного покрова. Использование георадаров для проведения снегосьемок даст возможность повысить качество измерений, увеличит количество обследуемых маршрутов в интересах потребителей и прогнозистов и будет способствовать привлечению молодого высоко квалифицированного персонала.

Преимущества автоматизации снегосьемки:

- сокращение ручного труда на метеостанциях;
- проведение работ при помощи экспедиционного состава без привлечения персонала наблюдательной сети;
- расширение обследуемых площадей;
- увеличение качества проводимых наблюдений;
- повышение качества прогнозов паводка и влагозапаса;
- сокращение затрат на проведение наблюдений;
- повышение привлекательности труда для молодых специалистов.

Заключение

Внедрение нетрадиционных современных технологий для производства метеорологических наблюдений позволит не только повысить их эффективность и качество, но и сократить низкоквалифицированный персонал, а, как следствие, поднять среднюю заработную плату и привлечь в службу молодых специалистов.

В статье приведены предложения по внедрению новых технологий только для ограниченного набора наблюдений, связанного с проведением мониторинга снежного и ледового покрова. Более глубокое изучение проблемы модернизации наблюдательной сети позволит внедрить современные методы для производства других типов наблюдений и вывести ее на современный технологический уровень.

Список литературы

1. Разведка дроном: особенности первого российского арктического беспилотника. 2023: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://strana-rosatom.ru/2023/04/06/razvedka-dronom-osobennosti-pervogo/> (дата обращения: 06.04.2023).
2. Алексеева Т. А., Фролов С. В., Сероветников С. С. Обзор методов и основных результатов измерения толщины морского льда в Арктике. // *Российская Арктика*. 2021. № 12. С. 33—49. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-33-49.
3. Смирнова В. Г. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ААНИИ. 2011. 240 с.
4. Benjamin Holt, Pannirselvam Kanagaratnam, Siva Prasad Gogineni et al. Sea ice thickness measurements by ultrawideband penetrating radar: First results. // *Cold Regions Science and Technology*. 2009. Vol. 55 P. 33—46.
5. Богородский В. В., Оганесян А. Г. Автоматизация радиолокационного измерения толщины морских льдов. // *Журнал Технической Физики*. 1987. Том 57. Выпуск 8. С. 1649—1653.
6. Ничипоренко Н. Т., Сиваченко Б. Н., Зеркаль А. Д. Измерение толщины льда на акватории морского порта с помощью прибора «Пикор-лед» // *Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2020. 12.3. С. 576—582. DOI:10.21821/2309-5180-2020-12-3-576-582.
7. Schmid L., Heilig A., Mitterer C. et al. Continuous snowpack monitoring using upward-looking ground-penetrating radar technology. // *Journal of Glaciology* 2014. Vol. 60. No. 221. P. 509—525. doi: 10.3189/2014JoG13J084

References

1. Drone reconnaissance: features of the first Russian Arctic drone. 2023: [Electronic resource]. Access mode: <https://strana-rosatom.ru/2023/04/06/razvedka-dronom-osobennosti-pervogo/> (date of access: 04/06/2023).
2. Alekseeva T. A., Frolov S. V., Serovetnikov S. S. Review of methods and main results of measurement of sea ice thickness in the Arctic. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2021; (12): 33—49. (In Russ.). DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-33-49.
3. Smirnova V. G. *Sputnikovyye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morey = Satellite methods for determining the characteristics of the ice cover of the seas*. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Scientific Research Institute Goskomgidrometa SSSR. 2011: 240 p. (In Russ.).
4. Benjamin Holt, Pannirselvam Kanagaratnam, Siva Prasad Gogineni et al. Sea ice thickness measurements by ultrawideband penetrating radar: First results. *Cold Regions Science and Technology*. 2009; Vol. 55 P. 33—46.
5. Bogorodsky V. V., Oganesyanyan A. G. Automation of radar measurement of sea ice thickness. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Journal of technical physics*. 1987; 57(8): 1649—1653 (In Russ.).

6. Nichiporenko N. T., Sivachenko B. N., Zerkal A. D. Measurement of the ice thickness in the seaport water area using the Picor-Ice instrument. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* = Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova. 2020; 12(3): 576—582. doi:10.21821/2309-5180-2020-12-3-576-582. (In Russ.).
7. Schmid L., Heilig A., Mitterer C. et al. Continuous snowpack monitoring using upward-looking ground-penetrating radar technology. *Journal of Glaciology* 2014. Vol. 60. No. 221. P. 509-525. doi: 10.3189/2014JoG13J08.

Информация об авторе

Цепелев Валерий Юрьевич, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ, v0010200@mail.ru.

Статья поступила 18.05.2023

Принята в печать 28.05.2023

The article was received on 18.05.2023

The article was accepted 28.05.2023

Всероссийская научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития»

В рамках реализации плана научной деятельности с 21 по 23 марта 2023 года в Российском государственном гидрометеорологическом университете прошла Всероссийская научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития».

В работе конференции приняли участие ученые и преподаватели из более чем 40 научно-исследовательских организаций и университетов страны. География участников конференции обширна: Санкт-Петербург, Астрахань, Владивосток, Воронеж, Иркутск, Казань, Калининград, Москва, Муром, Обнинск, Петрозаводск, Севастополь, Сухум, Томск, Феодосия, Южно-Сахалинск и Якутск. Конференция проходила в гибридном формате с возможностью дистанционного участия, что позволил собрать участников из разных регионов страны с учетом часовых поясов и сделать работу конференции более комфортной.

В рамках конференции проведено пленарное заседание и организована работа восьми секций, две из которых были посвящены студенческим научным изысканиям. В первый день проведения научно-практической конференции состоялось торжественное открытие и пленарное заседание. В ходе заседания были



Пленарное заседание.

заслушаны доклады о перспективных направлениях в гидрометеорологии и основных научных результатах деятельности Российского государственного гидрометеорологического университета.

Работа конференции во все дни была организована в формате параллельного функционирования двух секций: «Внедрение современных автоматизированных и дистанционных методов наблюдений и систем сбора/обработки данных, перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в гидрометеорологии», «Цифровые технологии в гидрометеорологии: интернет, дистанционное зондирование, ГИС, искусственный интеллект, формирование единого фонда цифровых гидрометеорологических пространственных данных». Сразу после окончания пленарного заседания началась работа первых двух секций, которые были посвящены возможностям применения различных метеорологических измерений для решения диагностических и прогностических задач, стоящих перед специалистами, а также для экологического мониторинга окружающей среды. За время работы этих двух секций было заслушано 22 устных доклада.

Наибольший интерес вызвали тематики исследований, которые рассматривались в работе секций: «Анализ и прогноз изменений климата, климатические риски», «Фундаментальные и прикладные проблемы океанологии и гидрологии». Различным аспектам проблемы изменения климата было посвящено 28 устных



Приветственное слово.

и 8 стендовых докладов. По результатам исследований в области океанологии и гидрологии было заслушано 23 доклада.

На секции «Математическое моделирование гидрометеорологических процессов» были представлены результаты применения методов вычислительной математики и информационных технологий в гидрометеорологии. Практическая значимость улучшения качества прогнозов погоды была отражена в докладах, представленных на секции «Совершенствование методов прогнозов погоды».

Проявленный интерес к конференции и результаты обсуждений показали, что в настоящее время есть понимание необходимости изучения новых технологий, новых областей гидрометеорологии и новых способов понимания погодных условий. Появление новых, инновационных и технологически продвинутых систем прогнозирования и сетей связи предоставляет национальным гидрометеорологическим службам ряд интересных возможностей для улучшения их метеорологического обслуживания населения и эффективной интеграции распространения и предоставления данного обслуживания.

Модераторами секций были выделены лучшие доклады, которые представлены в оргкомитет конференции. В свою очередь оргкомитет предложил преобразовать доклады в научные статьи для представления в редколлегию журнала «Гидрометеорологии и экология», входящего в Перечень ВАК.

Всемирный метеорологический день, который отмечается 23 марта, в этом году совпал с празднованием 150-летия Всемирной метеорологической организации. Ему была посвящена работа двух студенческих секций: «Исследование окружающей среды» и «Исследование Арктики: прошлое, настоящее и будущее».

С приветственным словом в начале работы первой студенческой секции выступила проректор по учебной работе Верещагина Наталья Олеговна, отметив важность проведения такого рода конференций и участия в них студентов.

Подавляющее большинство докладов представили студенты РГГМУ. В основном, это были студенты четвертого курса и магистранты. Во второй секции были представлены работы, посвященные различным аспектам погоды, климата и экологии полярного региона. Несмотря на то, что устных докладов было всего восемь, а стендовых — только два, эти доклады были сделаны студентами из разных университетов Санкт-Петербурга и Архангельска.

Отдельного внимания заслуживает волонтерская работа студентов, которая была достойным образом организована сотрудниками деканата метеорологического факультета. Волонтеры сопровождали участников до места проведения пленарного заседания и секций, активно помогали при регистрации и проведении кофе-брейков. Без их помощи конференция не была бы такой успешной.

В заключение следует отметить, что все участники конференции высоко оценили уровень организации ее работы и выразили глубокую благодарность руководству Российского государственного гидрометеорологического университета, программному и организационному комитетам.



Работа студенческой секции «Исследование окружающей среды».



Помощь волонтеров.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 71

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Технический редактор М.В. Иванова

Подписано в печать 05.07.2023. Выход в свет 11.07.2023. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,025. Тираж 50 экз. Заказ № 1425. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
