

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 69

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2022

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 69. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГТМУ, 2022. 172 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; **Лил В. У.**, PhD, проф. Гамбургского ун-та (Германия) и Манчестерского ун-та (Великобритания); **Малори Жан**, PhD, профессор, почетный президент РГТМУ (Франция); **Орыщенко А. С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Сальников В. Г.**, д-р геогр. наук, проф., декан ф-та географии и природопользования Казахского национального университета им. Аль-Фараби; **Сильников М. В.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, директор Института военно-технического обучения и безопасности СПбПУ; **Тимофеева А. Г.**, канд. геогр. наук, директор Института непрерывного обучения РГТМУ; **Федоров М. П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Хуакин Л.**, PhD, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Джейянг (КНР).

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.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Кудряцев В. Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Лобанов В. А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мохов И. И.**, д-р физ.-мат. наук, академик РАН; **Мушкет И. И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Перцев Н. Н.**, д-р физ.-мат. наук; **Прошутинский А. Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Румянцев В. А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябенко В. А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С. П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Татарникова Т. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Тимофеев Ю. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Федорова Н. Ю.**, канд. пед. наук, доцент; **Филатов Н. Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Хоссфельд Уве**, PhD, университет Йена (Германия); **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Журнал 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), 2022

© Авторы публикаций, 2022

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

№ 69

A theoretical research journal

*Published since October, 2005
4 issues a year*

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2022

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 69. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2022. 172 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; **Huaqing Lu**, PhD, Professor, Vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Kambolov M. A.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-president of the National Research Center «Kurchatov Institute»; **Kuleshov Iu. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Vice-president of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research;

Kvint V. L., Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Leal W.**, PhD, Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (UK); **Malaurie Jean**, PhD, Professor, Honorary President of RSHU, France; **Otryshchenko A. S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Salnikov V. G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of 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; **Dmitriev V. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Fedorova N. Iu.**, PhD in Pedagogic Sciences, Associate Professor; **Filatov N. N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Hossfeld Uve**, PhD (University of Jena, Germany); **Ivanov V. V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V. N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Lobanov V. A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mokhov I. I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Mushket I. I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Pertsev N. N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Proshutinskii A. Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Rumyantsev V. A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S. P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Tatarnikova T. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Timofeev Iu. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shchukin G. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor.

The Journal is 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, geoecology, 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), 2022
© Authors of publications, 2022

Содержание

Метеорология

- Ф. А. Иманов, А. В. Сикан.* Анализ изменений климата на территории
Азербайджана 607
- Е. М. Лившиц, В. И. Петров.* Слияние мощных конвективных штормов.
Типизация 620

Гидрология

- Р. В. Боскачёв, Б. В. Чубаренко.* Анализ изменчивости гидрологических
характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная
Балтика) 644

Океанология

- Е. Е. Круглова, С. А. Мысленков.* Анализ штормовой активности в Карском
море по данным волновой модели WAVEWATCHIII. 675

Экология

- А. А. Ершова, Т. Р. Ерёмина, И. Н. Макеева, Д. В. Панькин, Ю. А. Татаренко,
А. В. Березина, А. С. Кузьмина.* Микропластиковое загрязнение морской
среды Баренцева и Карского морей в 2019 г. 691
- А. А. Токарева.* Оценка возможного воздействия Астраханского газового
комплекса на почвенный покров за пределами санитарно-защитной
зоны 712

В порядке обсуждения

- М. Т. Мами, В. А. Лобанов.* Современные климатические изменения
температуры воздуха в Центральной Африке 722
- В. Н. Калинин.* Грозит ли Каспию судьба Арала? 746

Хроника

- К 70-летию Александра Сергеевича Аверкиева 761
- Летняя школа «Международные отношения и устойчивое развитие» 763
- Рабочая встреча между ФГБОУ «РГГМУ» и Научно-исследовательским
институтом по защите окружающей среды и здоровья населения
Вьетнама 766
- Фестиваль национальных культур «Меридианы дружбы» 769

Contents

Meteorology

- F. A. Imanov, A. V. Sikan.* Analysis of climate change in the territory of Azerbaijan. 607
- E. M. Livshits, V. I. Petrov.* Merging of convective storms and their typing 620

Hydrology

- R. V. Boskachev, B. V. Chubarenko.* Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic) 644

Oceanology

- E. E. Kruglova, S. A. Myslenkov.* Analysis of storm activity in the Kara Sea according to the wave model WAVE WATCH III. 675

Ecology

- A. A. Ershova, T. R. Eremina, I. N. Makeeva, D. V. Pankin, Yu. A. Tatarenko, A. V. Berezina, A. S. Kuzmina.* Microplastic contamination of marine environment of the Barents and Kara seas in 2019 691
- A. A. Tokareva.* Assessment of the Astrakhan gas complex's potential affecting the soil cover outside the sanitary protection zone. 712

Discussion

- M. T. Mami, V. A. Lobanov.* Modern climate changes in the air temperature in Central Africa 722
- V. N. Malinin.* Does the fate of the Aral Sea threaten the Caspian? 746

- Chronicle.** 761

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 607—619.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):607—619.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.582(479.24)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-607-619

Анализ изменений климата на территории Азербайджана

Фарда Али оглы Иманов¹, Александр Владимирович Сикан²

¹ Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан, farda_imanov@mail.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Выполнен анализ рядов среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков за период с 1900 по 2018 гг. Используются данные по 6 метеорологическим станциям. Установлено, что на всей территории Азербайджана (за исключением Нахичевани) в рядах среднегодовых температур воздуха наблюдается значимый тренд на повышение. Показано, что наиболее интенсивный рост температуры начался с середины 90-х годов прошлого века. Средняя многолетняя температура воздуха на территории Азербайджана за период с 1995 по 2018 г. повысилась по сравнению с предшествующим периодом на 1,1 °С. На большей части территории Азербайджана наблюдается тенденция к снижению годовых сумм осадков. Исключение — Бакинский экономический район, где зафиксирован рост осадков.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, годовая сумма осадков, линейный тренд, стационарность рядов.

Для цитирования: Иманов Ф. А., Сикан А. В. Анализ изменений климата на территории Азербайджана // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 607—619. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-607-619.

METEOROLOGY

Original article

Analysis of climate change in the territory of Azerbaijan

Farda A. Imanov¹, Alexander V. Sikan²

¹ Baku State University

² Russian State Hydrometeorological University

Summary. The analysis of the series of mean annual air temperatures and annual precipitation for the period from 1900 to 2018 has been carried out. We used data from 6 meteorological stations, evenly distributed over the territory of the republic. It has been established that throughout the territory of Azerbaijan (with the exception of Nakhichevan) a significant upward trend is observed in the series of average annual air temperatures. To assess the significance of the trend, Student's t-test was used. The significance level is

taken to be 5 %. Smoothed difference integral curves were plotted to identify breaking points in the series of mean annual air temperatures. The smoothing of the integral curves was made using the 4253H filter in the Statistica program. It is shown that the most intensive rise in temperature began in the mid-90s of the last century. The average long-term air temperature in the territory of Azerbaijan for the period from 1995 to 2018 increased by 1.1 °C compared to the previous period. This conclusion is confirmed by the long-term dynamics of air temperature changes at other meteorological stations located in various regions of Azerbaijan (Mahmudov, 2018), including mountainous regions, where these stations are located outside of settlements.

In most of the territory of Azerbaijan, there is a trend towards a decrease in annual precipitation. The exception is the Baku economic region, where an increase in precipitation has been recorded. It has been established that the average long-term value of the annual amount of precipitation in most of the territory of Azerbaijan over the past 25 years has decreased by an average of 45 mm compared to the previous period.

The revealed changes are in good agreement with the course of long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea, in the basin of which the entire territory of Azerbaijan is located. After a significant rise in the water level that took place in 1978—1995 (2.35 m), since 1996, its intensive decline began (1.39 m in 2019).

Keywords: climate change, air temperature, annual precipitation, linear trend, stationarity of series.

For citation: Imanov F. A., Sikan A. V. Analysis of climate change in the territory of Azerbaijan. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):607—619. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-607-619. (In Russ.).

Введение

Глобальное потепление, которое началось с 1970—80-х гг., является неоспоримым фактом и подтверждается многочисленными наблюдениями. Повысилась глобальная средняя температура воздуха и океанической воды, отмечается активное таяние ледников, повышается уровень Мирового океана. За последние 130 лет температура в мире возросла примерно на 0,85 °C [1].

По данным компьютерного моделирования, к середине XXI в. прогнозируется существенное уменьшение (до 20 %) летних осадков на средних широтах, за исключением восточной части Азии и годовых сумм осадков во многих регионах субтропического пояса. По всему Земному шару ожидается увеличение испаряемости [2].

Климатические показатели изменяются и на территории Азербайджана. Выполненные ранее исследования [3—5] показали, что по сравнению с 1961—1990 гг. в 1991—2015 гг. средняя годовая температура воздуха повысилась на 0,7 °C. Рост температуры наблюдается во всех высотных поясах страны, но наибольшее повышение температуры характерно для высот выше 1000 м.

По данным работы [4], в Азербайджане за 1991—2015 гг. годовая сумма осадков увеличилась на 11 мм. Для зоны выше 1000 м эта цифра составила всего 5 мм. За период 1986—2013 гг. уменьшились площади горных ледников Большого Кавказа на 0,04—0,17 км².

Имеются и другие оценки изменения суммарных атмосферных осадков. В работах [6, 7] указывается на уменьшение осадков (на 9,9 %) и снижение числа дней с осадками в период с 1991 по 2001 гг.

В рамках программы развития ООН (ПРООН) были выполнены исследования региональных изменений климата во всех трех странах Южного Кавказа

(Азербайджан, Армения и Грузия) с помощью моделирования [8]. В этом исследовании в качестве базовых данных использовались Вторые Национальные Сообщения к Рамочной конвенции об изменении климата, в которых были применены модели MAGICC / SCENGEN и PRECIS, и был рассмотрен сценарий A2. Согласно моделям, в 2030—2050 гг. температура на Южном Кавказе, вероятно, повысится на 1—2 °С по сравнению с периодом 1980—1999 гг. Ожидается, что с 2050 г. до конца XXI в. рост температуры составит 3—5 °С [8].

Согласно оценкам, проведенным для Второго национального сообщения Азербайджана, к 2050 г. предполагается увеличение количества осадков на 10—20 % по сравнению с периодом 1961—1990 гг. [6]. Однако, к 2100 г. температура повысится на 5 °С [9] и количество осадков уменьшится на 5—23 % [8]. К тому же территория страны очень чувствительна к климатическим изменениям.

Изменения климата влияет на режим и стоковые характеристики рек Азербайджана: уменьшается годовой сток, максимальные расходы воды весеннего половодья, увеличивается минимальный зимний сток [10, 11]. С 1996 г. быстро снижается уровень Каспийского моря, и есть основания полагать, что в ближайшие годы уровень опустится еще ниже [12—14].

Цель настоящего исследования — установление современных тенденций изменения климата и сроков начала этих изменений на территории Азербайджана путем анализа рядов среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков.

Материалы и методы исследования

Для анализа изменений климата на территории Азербайджана были применены данные по 6 метеорологическим станциям (табл. 1).

Использовались ряды среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков (с устраненными погрешностями) за 1900—2018 гг. Вся информация была представлена Национальной службой гидрометеорологии Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджанской республики.

Таблица 1

Сведения о метеорологических станциях Азербайджана

Information about meteorological stations in Azerbaijan

Метеорологическая станция		Код станции (ID)	Высота, м	Широта, град.	Долгота, град.
на русском	на английском				
Баку (обсерватория)	Baku	378500-99999	5	40,350	49,833
Ленкорань	Lankaran	379850-99999	–12	38,733	48,833
Гянджа	Gandja	377350-99999	311	40,717	46,417
Закатала	Zakatala	375750-99999	490	41,667	46,650
Губа	Guba	376750-99999	552	41,367	48,517
Нахичевань	Nakhchivan	378635-99999	873	39,189	45,458

Для оценки линейных трендов в анализируемых временных рядах использовался критерий значимости выборочного коэффициента корреляции (R).

Гипотеза об отсутствии тренда не опровергалась, если выполнялось условие:

$$|R| < t_{2\alpha} \sigma_R, \quad (1)$$

где $t_{2\alpha}$ — теоретическое значение статистики Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 5\%$ и числе степеней свободы $n - 2$; n — длина ряда; σ_R — стандартная ошибка коэффициента корреляции, определяемая по формуле:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1 - R^2}{n - 2}}. \quad (2)$$

Проверка однородности проводилась с использованием критериев Стьюдента и Фишера [11].

Для выявления точки начала климатических изменений строились сглаженные разностные интегральные кривые. Сглаживание выполнено с использованием фильтра 4253H в программе Statistica [12].

Обсуждение результатов

Температура воздуха. Как показал анализ, на всей территории Азербайджана (за исключением Нахичевани) в рядах среднегодовых температур воздуха наблюдается значимый тренд на повышение (рис. 1). Результаты проверки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка значимости линейных трендов в рядах среднегодовых температур воздуха на территории Азербайджана при уровне значимости $2\alpha = 5\%$

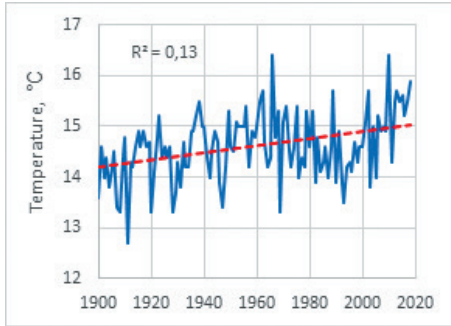
Assessment of the significance of linear trends in the series of average annual air temperatures in the territory of Azerbaijan at a significance level of $2\alpha = 5\%$

Метеорологическая станция	R	σ_R	$ R /\sigma_R$	$t_{2\alpha} = 5\%$	Значимость тренда	Интенсивность тренда, °C/10 лет
Баку (обсерватория)	0,36	0,086	4,22	1,98	да	+0,07
Ленкорань	0,29	0,089	3,23	1,98	да	+0,06
Гянджа	0,61	0,075	8,17	1,98	да	+0,17
Закагала	0,55	0,077	7,22	1,98	да	+0,13
Губа	0,73	0,063	11,7	1,98	да	+0,24
Нахичевань	0,14	0,092	1,53	1,98	нет	+0,05

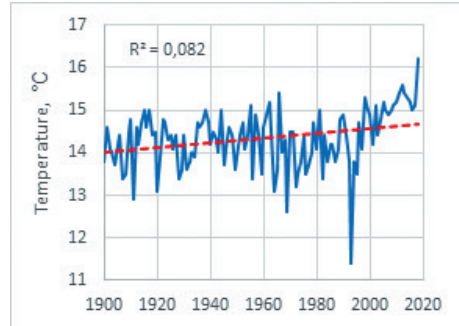
При этом наиболее интенсивный рост температуры начался с середины 90-х годов прошлого века. Этот вывод подтверждается многолетней динамикой изменения температуры воздуха и на других метеорологических станциях, расположенных в различных регионах Азербайджана [4], включая горные районы, где эти станции находятся за пределами населенных пунктов и не подвержены влиянию локальных антропогенных факторов.

Для выявления точки перелома строились сглаженные разностные интегральные кривые (рис. 2). Из графиков видно, что точки перелома приходятся на 1995—1998 гг., то есть, можно предполагать, что в различных регионах Азербайджана

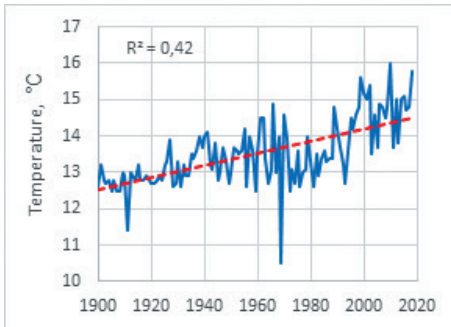
МС Баку; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



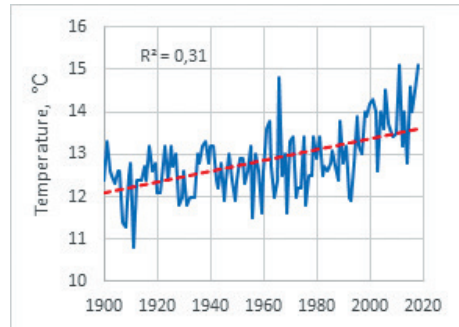
МС Ленкорань; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



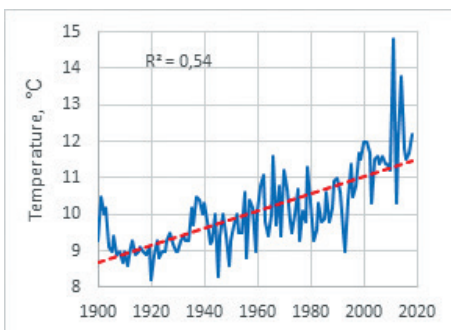
МС Гянджа; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



МС Закатала; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



МС Губа; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



МС Нахичевань; тренд не значим при $2\alpha = 5\%$

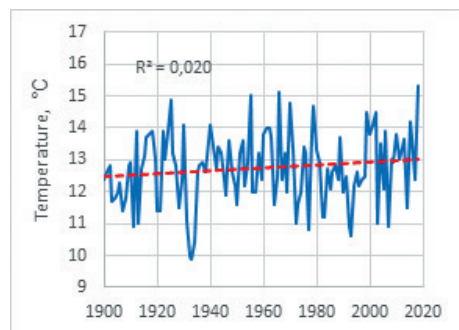


Рис. 1. Хронологические графики среднегодовых температур воздуха на территории Азербайджана.

Fig. 1. Chronological graphs of average annual air temperatures on the territory of Azerbaijan.

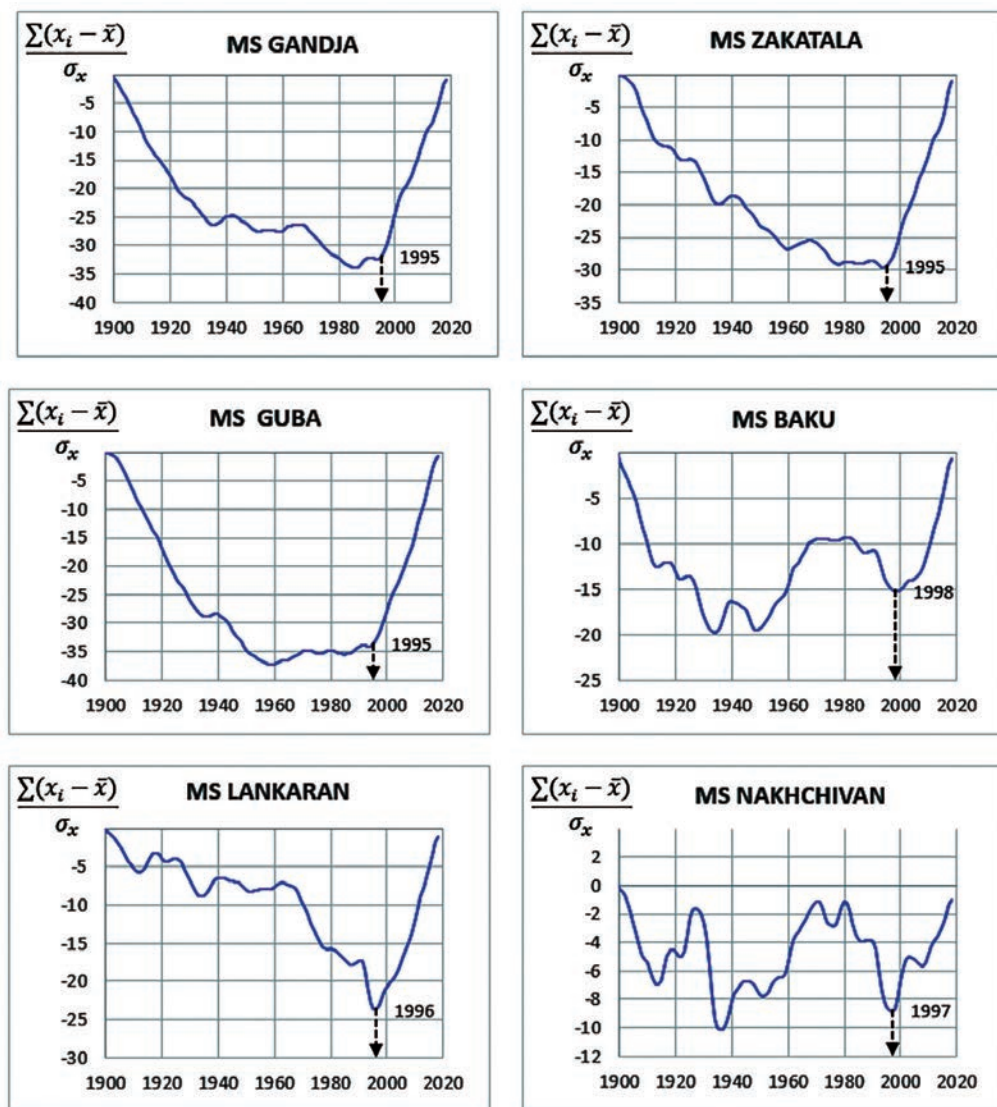


Рис. 2. Сглаженные разностные интегральные кривые среднегодовых температур воздуха на территории Азербайджана.

Fig. 2. Smoothed difference integral curves of mean annual air temperatures on the territory of Azerbaijan.

глобальное потепление начало проявляться в эти годы. Этот вывод хорошо согласуется ходом многолетних колебаний уровня Каспийского моря, в бассейне которого расположена вся территория Азербайджана. После существенного подъема

уровня воды, имевшего место в 1978—1995 гг. (2,35 м), с 1996 г. началось интенсивное его снижение (1,39 м на 2019 г.), которое сопровождается повышением температуры воздуха и уменьшением осадков во всем бассейне Каспия [17].

Средняя многолетняя температура воздуха на территории Азербайджана за период с 1995 по 2018 г. повысилась по сравнению с предшествующим периодом в среднем на 1,1 °С. При этом следует отметить, что синхронность в многолетних колебаниях температуры воздуха наблюдается только на метеорологических станциях, расположенных на севере и северо-западе республики (Гянджа, Закатала, Губа), но потепление началось на всех станциях практически одновременно.

Осадки. В настоящее время на большей части территории Азербайджана наблюдается тенденция к снижению осадков (рис. 3), но значимые отрицательные тренды выявлены только на МС Ленкорань и Губа. Исключение составляет МС Баку, где наблюдается значимый тренд на повышение. Аналогичные результаты были получены в работе [18], где отмечается, что по сравнению с предшествующим периодом (1961—1990 гг.) за последние 25 лет увеличение годовых осадков на МС Баку составило 33,4 %.

Результаты проверки рядов годовых сумм осадков на стационарность представлены в табл. 3. В табл. 4 приведены результаты проверки рядов годовых сумм осадков на однородность с использованием критериев Стьюдента и Фишера (при проверке ряды делились на две равные части).

Таблица 3

Оценка значимости линейных трендов в рядах годовых сумм осадков на территории Азербайджана при уровне значимости $2\alpha = 5\%$

Assessment of the significance of linear trends in the series of annual precipitation in the territory of Azerbaijan at a significance level of $2\alpha = 5\%$

Метеорологическая станция	R	σ_R	$ R /\sigma_R$	$t_{2\alpha=5\%}$	Значимость тренда	Интенсивность тренда, мм / 10 лет
Баку (обсерватория)	0,430	0,083	5,16	1,98	да	+9,9
Ленкорань	0,230	0,090	2,57	1,98	да	-16,6
Гянджа	0,170	0,091	1,91	1,98	нет	-2,8
Закатала	0,096	0,092	1,05	1,98	нет	-4,8
Губа	0,480	0,081	5,97	1,98	да	-14,5
Нахичевань	0,110	0,092	1,24	1,98	нет	-1,9

Таблица 4

Оценка однородности рядов годовых сумм осадков на территории Азербайджана при уровне значимости $2\alpha = 5\%$

Evaluation of the homogeneity of the series of annual precipitation in the territory of Azerbaijan at a significance level of $2\alpha = 5\%$

Метеорологическая станция	Критерий Стьюдента			Критерий Фишера		
	$ t^* $	$t_{2\alpha}$	$H_0: X_1 = X_2$	F^*	$F_{2\alpha}$	$H_0: D_1 = D_2$
Баку (обсерватория)	3,88	1,98	нет	2,45	1,68	нет

Метеорологическая станция	Критерий Стьюдента			Критерий Фишера		
	$ t^* $	$t_{2\alpha}$	$H_0: X_1 = X_2$	F^*	$F_{2\alpha}$	$H_0: D_1 = D_2$
Ленкорань	2,22	1,98	нет	1,33	1,68	да
Гянджа	0,99	1,98	да	1,33	1,68	да
Закатала	0,50	1,98	да	1,45	1,68	да
Губа	4,96	1,98	нет	1,35	1,68	да
Нахичевань	0,27	1,98	да	1,45	1,68	да

Как видно из табл. 4, для всех рядов, за исключением МС Баку, гипотеза об однородности по критерию Фишера не опровергается. По критерию Стьюдента гипотеза об однородности опровергается для трех метеорологических станций, где выявлен значимый тренд (Баку, Ленкорань, Губа).

Так же, как и для среднегодовых температур воздуха, были рассчитаны средние многолетние значения сумм годовых осадков за период с начала наблюдений по 1994 г. и за 1995—2018 гг. Результаты представлены в табл. 5. Как видно из таблицы, среднее многолетнее значение годовой суммы осадков за период с 1995 по 2018 г. уменьшилось по сравнению с предшествующим периодом в среднем на 45 мм.

Можно предположить, что уменьшение годовых осадков с 1995 по 2018 г. связано не только с глобальным потеплением климата, но и с естественно-природными колебаниями увлажненности территории, поскольку часть рядов (Гянджа, Закатала, Нахичевань) являются однородными и стационарными, но последние десятилетия приходятся на более сухой период (рис. 4).

Таблица 5

Средние многолетние значения сумм годовых осадков по МС Азербайджана

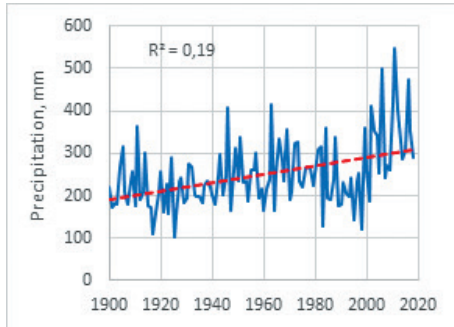
Average long-term values of the sums of annual precipitation according to the MS of Azerbaijan

Метеорологическая станция	Средняя многолетняя сумма годовых осадков, мм		Приращение, мм
	1900—1994	1995—2018	
Баку (обсерватория)	233	317	+83
Ленкорань	1201	1117	–84
Гянджа	279	256	–23
Закатала	973	941	–32
Губа	553	488	–64
Нахичевань	243	219	–24
		Среднее значение*	–45

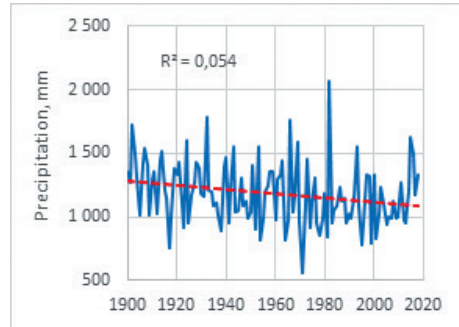
* Среднее значение рассчитано без учета данных по МС Баку.

По мнению ряда экспертов, колебания увлажненности связаны с циклической сменой характера атмосферной циркуляции и изменением траекторий движения циклонов над водосборным бассейном Каспия [19, 20].

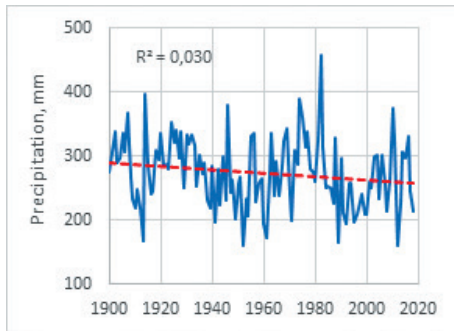
МС Баку; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



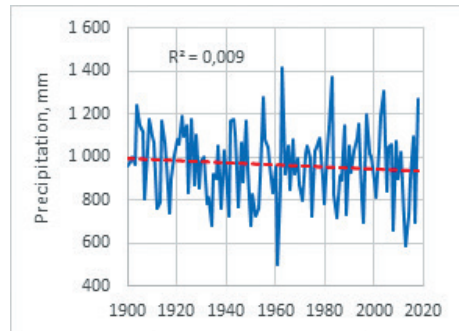
МС Ленкорань; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



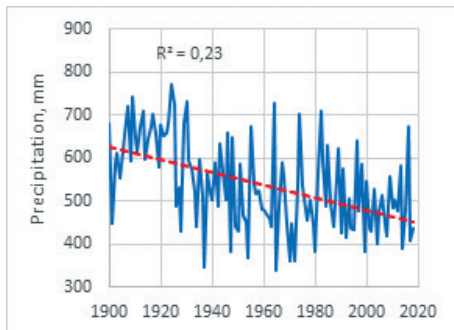
МС Гянджа; тренд не значим при $2\alpha = 5\%$



МС Закатала; тренд не значим при $2\alpha = 5\%$



МС Губа; тренд значим при $2\alpha = 5\%$



МС Нахичевань; тренд незначим при $2\alpha = 5\%$

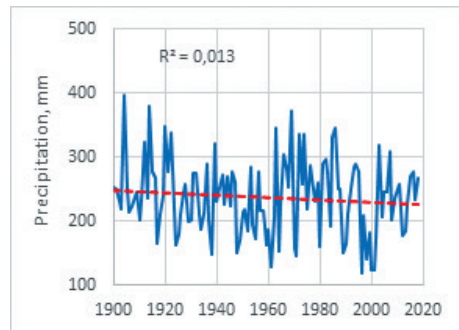


Рис. 3. Хронологические графики годовых сумм осадков на территории Азербайджана.

Fig. 3. Chronological graphs of annual precipitation in the territory of Azerbaijan.

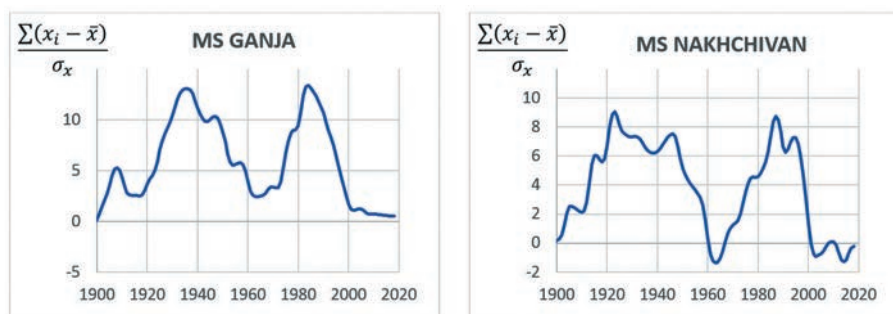


Рис. 4. Сглаженные разностные интегральные кривые годовых сумм осадков по МС Гянджа и Нахичевань.

Fig. 4. Smoothed difference integral curves of annual precipitation totals for meteorological stations Ganja and Nakhichevan.

Выводы

Результаты выполненного исследования подтверждают факт потепления климата в Азербайджане. Анализ рядов среднегодовых температур воздуха показал, что на всей территории страны (за исключением Нахичевани) наблюдается значимый тренд на повышение. Потепление начало проявляется с середины 90-х годов XX века. Средняя многолетняя температура воздуха на территории Азербайджана за период с 1995 по 2018 г. повысилась по сравнению с предшествующим периодом в среднем на 1,1 °C.

В отличие от температуры воздуха, на большей части территории Азербайджана наблюдается тенденция к снижению осадков. Установлено, что среднее многолетнее значение годовой суммы осадков за период с 1995 по 2018 г. уменьшилось по сравнению с предшествующим периодом в среднем на 45 мм.

Можно предположить, что уменьшение годовых осадков с 1995 по 2018 г. связано не только с глобальным потеплением климата, но и с естественно-природными колебаниями увлажненности территории.

Следует отметить, полученные результаты хорошо согласуются со сценарными оценками изменений климата в странах Южного Кавказа, которые были представлены в рамках исследования по программе развития ООН (ПРООН).

Список источников

1. IPCC, (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 688 p.
2. IPCC, (2008): Climate Change and Water. Technical Paper. Geneva. 228 p.
3. Мамедов А. С. Современные изменения климата в Азербайджане и их прогнозирование. Баку, 2015. 271 с. (На азерб.).
4. Махмудов Р. Н. Современные изменения климата и опасные гидрометеорологические явления. Баку, 2018. 232 с. (На азерб.).

5. Taghiyeva U. R., Verdiyev R. H. Adaptation of water sector to climatic changes according to principles of IWRM // *Water problems: science and technology*. 2020. № 2 (16). P. 7—21.
6. MoENR (2010). Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Ecology and Natural Resources and Republic of Azerbaijan, Baku. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/azenc2.pdf> (Дата посещения: 15 December 2016).
7. ENVSEC, (2016). Изменение климата и безопасность на Южном Кавказе. (Региональная оценка). 66 с.
8. UNDP (2011). Regional Climate Change Impacts Study for the South Caucasus Region. United Nations Development Programme. United Nations Development Programme, Tbilisi, Georgia.
9. MoENR (2015). Third National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Ecology and Natural Resources and Republic of Azerbaijan, Baku. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/azenc3.pdf> (Дата посещения: 15 December 2016).
10. Алиева И. С. Пространственно-временные закономерности поверхностного и подземного стока рек Большого Кавказа // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 58. С. 41—48. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-41-48.
11. Иманов Ф. А., Алиева И. С., Нуриев А. А., Нагиев З. А. Определение экологического стока реки Алиджанчай (Азербайджан) // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 66. С. 42—50. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-42-50.
12. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан—атмосфера—суша» // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2020. № 4. С. 5—20. doi: 10.17076/lim1156.
13. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980—2020) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
14. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change // *Geophysical Research Letters*. 2017. V. 44. P. 6993—7001. doi: 10.1002/2017GL073958.
15. Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2007. 279 с.
16. Боровиков В. П., Ивченко Г. И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере. М.: Финансы и статистика, 2000. 384 с.
17. Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 5. С. 488—495.
18. Сафаров С. Г., Сафаров Э. С., Гусейнов Дж. С., Исмайлылова Н. Н. Современные изменения атмосферных осадков на Каспийском побережье Азербайджана // *Океанологические исследования*. 2020. Т. 48, № 1. С. 27—44. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).2.
19. Берг Л. С. Уровень Каспийского моря за историческое время // *Очерки по физической географии*. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 205—272.
20. Рычагов Г. И. Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2011. № 2. С. 4—12.

References

1. IPCC, (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 688 p.
2. IPCC, (2008): Climate Change and Water. Technical paper. Geneva: 228 p.
3. Mamedov A. S. Modern climate changes in Azerbaijan and their forecasting. Baku, 2015: 271 p. (In Azerb.).
4. Makhmudov R. N. Modern climate change and dangerous hydrometeorological phenomena. Baku, 2018: 232 p. (In Azerb.).

5. Taghiyeva U. R., Verdiyev R. H. Adaptation of water sector to climatic changes according to principles of IWRM. *Water problems: science and technology*. 2020;2(16):7—21.
6. MoENR (2010). Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Ecology and Natural Resources and Republic of Azerbaijan, Baku. Available from: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/azenc2.pdf> (accessed 15 December 2016).
7. ENVSEC, (2016). Climate change and security in the South Caucasus. (Regional estimate). 66 p.
8. UNDP (2011). Regional Climate Change Impacts Study for the South Caucasus Region. United Nations Development Program. United Nations Development Program, Tbilisi, Georgia.
9. MoENR (2015). Third National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Ecology and Natural Resources and Republic of Azerbaijan, Baku. Available from: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/azenc3.pdf> (accessed 15 December 2016).
10. Alieva I. S. Spatial-temporary regularities of the surface and underground flows of the rivers of the Great Caucasus. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2020;(58):41—48. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-41-48. (In Russ.).
11. Imanov F. A., Aliyeva I. S., Nuriyev A. A., Nagiyev Z. A. Determination of the ecological flow of the Alijanchay river (Azerbaijan). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(66):42—50. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-42-50. (In Russ.).
12. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Caspian sea level as an indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(4):5—20. doi: 10.17076/lm1156. (In Russ.).
13. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980—2020). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021;18(5):277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291. (In Russ.).
14. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):6993—7001. doi: 10.1002/2017GL073958.
15. Sikan A. V. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. St. Petersburg: RSHU, 2007: 279 p. (In Russ.).
16. Borovikov V. P., Ivchenko G. I. *Prognozirovanie v sisteme STATISTICA v srede Windows. Osnovy teorii i intensivnaia praktika na komp'yutere = Forecasting in the STATISTICA system in the Windows environment. Fundamentals of theory and intensive practice on the computer*. Moscow: Finance and statistics, 2000. 384 p. (In Russ.).
17. Panin G. N., Solomonova I. V., Vyruchalkina T. Yu. The regime of the components of the water balance of the Caspian Sea. *Vodnye resursy = Water resources*. 2014;41(5):488—495. (In Russ.).
18. Safarov S. G., Safarov E. S., Guseinov J. S., Ismayilova N. N. Modern changes in atmospheric precipitation on the Caspian coast of Azerbaijan. *Okeanologicheskie issledovaniia = Oceanological Research*. 2020;48(1):27—44. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1.2). (In Russ.).
19. Berg L. S. The level of the Caspian Sea in historical time. *Ocherki po fizicheskoi geografii = Essays on physical geography*. Moscow—Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1949: 205—272. (In Russ.).
20. Rychagov G. I. Fluctuations in the level of the Caspian Sea: causes, consequences, forecast. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiia = Moscow University Bulletin. Series 5: Geography*. 2011;(2):4—12. (In Russ.).

Информация об авторах

Фарда Али оглы Иманов, д-р геогр. наук, профессор, проректор по организации учебного процесса и технологиям обучения, Бакинский Государственный Университет, farda_imanov@mail.ru.

Александр Владимирович Сикан, канд. геогр. наук, доцент, кафедра инженерной гидрологии Российского Государственного гидрометеорологического университета, sikan07@yandex.ru.

Information about authors

Farda A. Imanov, Dr. Sci. (Geogr.), professor, Vice-rector for the organization of the educational process and learning technologies, Baku State University.

Alexander V. Sikan, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.09.2022

Принята в печать 22.11.2022

The article was received on 01.09.2022

The article was accepted 22.11.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 620—643.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):620—643.

Научная статья

УДК 551.515.4:551.553.8

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-620-643

Слияние мощных конвективных штормов. Типизация

Евгений Михайлович Лившиц¹, Василий Иванович Петров²

¹ Свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия,
evmaleposoru@googlemail.com

² Свободный исследователь, Республика Молдова, Кишинев

Аннотация. Радиолокационные исследования с помощью АСУ-МРЛ в Республике Молдова выявили две группы последствий слияний мощных градовых мультячейковых штормов: 67 % штормов диссипируют, 33 % — развиваются. Обнаружен феномен, ранее в литературе не отмечавшийся, связанный с развитием слившихся штормов внутри узла мезо-β-масштабных конвективных структур. Сформулирована гипотеза, объясняющая причины, процесс и последствия слияния мощных конвективных штормов. Результаты могут быть полезны при проведении активных воздействий на конвективные облака, для штормоповещения, многих сфер народного хозяйства.

Ключевые слова: мощный конвективный шторм, слияние штормов, мезомасштабные конвективные ячейки (ММКЯ), мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ), линия фидерных облаков (ЛФО), узел, грань.

Для цитирования: Лившиц Е. М., Петров В. И. Слияние мощных конвективных штормов. Типизация // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 620—643. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-620-643.

Merging of convective storms and their typing

Evgenii M. Livshits¹, Vasilii I. Petrov²

¹ Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@googlemail

² Free Researcher, Kishinev, Republic of Moldova.

Summary. Radar studies with ASU-MRL in the Republic of Moldova have revealed two groups of effects of mergers of powerful hail melt storms: 67 % of storms dissipate and 33 % develop. It has been shown for the first time that the phenomenon of convective storm mergers is associated with storm development along the elements of meso-β-scale structures (MMCC and/or MMCL), which dictate the direction, speed and intensity of storm development, their convergence and ways of existence in the nodes and on the edges of these structures. A double phenomenon, not previously noted in the literature, has been found: the merging of two multicell storms in a node with consequent splitting of the merged storm into two, each of which continuing their movement and development along divergent trajectories. A hypothesis explaining the causes, process, and consequences of merging storms has been formulated. The cause of storm mergers is the configuration of convergence lines in the form of MMCC and/or MMCL, leading to the convergence of storms developing along these lines. The merger process is associated with the interaction of feeder cloud lines belonging to each of the storms; intersecting, the feeder cloud lines provide feeder cell amplification and explosive manifestation of radio echoes from them as merging storms; dissipation or development after the merger depends on the orientation of the MMCC and/or MMCL elements. The results are applicable in active influencing on convective clouds, in storm warning, and for the needs of the national economy.

© Лившиц Е. М., Петров В. И., 2022

Keywords: thunderstorm, storm merger, mesoscale convective cells (MSCC), mesoscale convective lines (MSCL), feeder cloud line (flanking line), node, facet.

For citation: Livshits E. M., Petrov V. I. Merging of convective storms and their typing. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):620—643. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-620-643. (In Russ.).

Введение

Слияние конвективных штормов — наиболее распространенный из всех феноменов, связанных с Cu cong и Cb. Но, прежде чем перейти к его описанию, необходимо сделать несколько предварительных замечаний, касающихся внутренней структуры конвективных штормов.

Мультиячейковые конвективные штормы состоят из совокупности облачных ячеек, радиолокационный образ которых, радиолокационные ячейки, имеют квазивертикальную структуру изоконтуров отражаемости, отображающей восходящие и нисходящие потоки в виде локальных относительных максимумов. В зависимости от соотношения диаметра радиолокационной ячейки (D) и расстояния между ячейками в шторме (L) можно говорить о «сильной» или «слабой» эволюции (при $L \geq D$ — «сильная», при $L < D$ — «слабая») [1]. При «сильной» эволюции возможно различать радиолокационные ячейки друг от друга. При «слабой» эволюции, чаще всего, локализация радиолокационной ячейки внутри шторма затруднена или невозможна. Важнейшим свойством радиолокационной ячейки является ее смещение по вектору ведущего потока $\vec{v}_n$.

Одним из свойств и одновременно отличием мультиячейкового шторма от радиолокационных ячеек является наличие в нем «навеса радиоэха», накрывающего сверху область локализации восходящего потока [2]. В зарубежных работах понятие «навеса радиоэха» не применяется, вместо этого используют такие, как WER (Weak Echo Region — область слабого радиоэха, связанная с локализацией мощного восходящего потока в целом) и BWER (Bounded Weak Echo Region — ограниченная область слабого радиоэха — часть области слабого радиоэха в виде купола, локализирующего место самого сильного восходящего потока) [3—5]. Смещение шторма как единого целого ($\vec{v}_ш$) определяется соотношением:

$$\vec{v}_ш = \vec{v}_n + \vec{v}_э, \quad (1)$$

где $\vec{v}_n$ — направление (откуда) и скорость ветра на высоте 600 гПа (ведущий поток), а $\vec{v}_э$ — вектор эволюции, указывающий направление (откуда) и скорость обновления шторма за счет вхождения в его радиолокационное тело фидерных, «кормящих» шторм, ячеек. Линия фидерных облаков (ЛФО — Flanking Line), представляющая линейную совокупность фидерных ячеек [6], является самым важным свойством, отличающим конвективный шторм от радиолокационной ячейки. Чаще всего фидерным ячейки радаром не обнаруживаются, однако являются неотъемлемой частью шторма.

Актуальность изучения феномена слияния конвективных облаков диктуется не только тем, что это явление весьма распространено, но и в огромной степени тем, что мощные конвективные штормы наносят огромный ущерб градобитиями,

катастрофическими осадками, электрическими разрядами и мощными ветрами. Кроме того, конвективные штормы являются объектами активных воздействий с целью подавления града, модификации осадков. Все это требует тщательного изучения с целью поиска методов прогнозирования перечисленных явлений и, насколько это возможно, уменьшения негативных последствий таких природных явлений.

Изучению этого феномена посвящено большое количество работ, в которых описываются механизмы, приводящие к слиянию облаков: *конвергенция на низких уровнях* [7], *взаимодействие сдвига ветра и нисходящих потоков* [7, 8]; *градиент давления между двумя штормами*, находящимися на разных стадиях развития [9, 10]; *оттоки верхнего уровня* [8], *разные скорости распространения двух штормов* [7, 11], *увеличение горизонтальных размеров сближающихся облаков* [8], *вращение облаков* [12]. С процессом слияний конвективных облаков многие исследователи связывают появление «*облачного моста*», объединяющего два радиоэха от среднего уровня с распространением до земли [7—9]; *усиление молниевой (грозовой) активности* [13—15], *увеличение объемов слившихся облаков, увеличение радиолокационной отражаемости Z, высоты облаков, интенсивности* и суммарного количества осадков, *площадей осадков* [16—20] и т.п. *Эффективность* процесса слияния, как считают авторы численных экспериментов с трехмерной моделью, *связана с толщиной приземного слоя* [10] и/или от *взаимного расположения сливающихся облаков и сдвига ветра* в тропосфере [21].

Большое количество литературы, освещающей процессы слияния облаков, дают нам, на первый взгляд, много информации о данном феномене [7—21]. Тем не менее, вследствие смешения понятий: облако — ячейка, облако — конвективная ячейка, облако — радиолокационная ячейка, ячейка — шторм, фидерная ячейка — шторм и других, существует терминологическое разнообразие, а точнее сказать, неразбериха. Часто, например, в работах [7, 8] вообще не разделялись случаи слияния фидерных ячеек со штормом от случаев слияния штормов. В некоторых исследованиях [17—19], использовавших программы вторичной обработки информации Titan [22], радиолокационные данные аппроксимировались эллипсом на основании расчетов в квадратах 5×5 км с частотой обзора каждые 5 мин. В другом, используя систему АКСОПРИ, авторы [23], применительно к полям осадков, получали информацию в квадратах 4×4 км с частотой каждые 10 мин. Таким образом, применение методов логико-математической компьютерной обработки эхо-сигналов от облачных объектов, хотя и дало какое-то представление о рассматриваемых радиоэхо от облаков, привело во многих случаях к тому, что реальные объекты (радиолокационные ячейки, фидерные ячейки, штормы в целом) превращаются в пиксели размером, соизмеримым с самими изучаемыми радиолокационными объектами. В зависимости от шага сетки и алгоритмов обработки, зачастую, получаются новые объекты, сильно отличающиеся от реальных. Для площадных измерений осадков, для климатических исследований, прогнозирования явлений синоптического масштаба и т.п., такой подход, вероятно, может быть приемлемым. В наших исследованиях, напротив, мы концентрируем свое внимание на подробном изучении конкретных радиолокационных

ситуаций. С помощью системы АСУ-МРЛ [24] мы получаем информацию в квадратах 500×500 м с частотой 3,5 мин. Это дает возможность в 190 раз более точнее и подробнее, чем, например, система АКСОПРИ, изучать радиолокационные объекты и феномены, всегда имея в виду — что стоит за тем или иным радиолокационным образом, в какой степени получаемая картина радиоэха соответствует реальным физическим процессам, происходящим в облаках.

Предметом данного исследования является описание самого процесса слияния конвективных штормов, последствий этих слияний — развитие или диссипация, изменение радиолокационных и геометрических параметров до, в процессе и после слияния, а также поиск механизмов, приводящих к реализации феномена слияния.

Исходные материалы и методика исследований

Основными материалами для исследований послужили радиолокационные наблюдения радаром МРЛ-5 ($\lambda = 10$ см) с АСУ-МРЛ [24] в системе противорадиолокационной защиты (ПРЗ) Республики Молдова. Из непрерывных радиолокационных наблюдений с частотой обзора полусферы около 3—3,5 мин было отобрано 138 случаев с тем, чтобы представить наиболее полный спектр возможных типов слияний штормов. При этом использовались горизонтальные сечения радиоэха на различных высотах и наиболее характерные вертикальные сечения. Измерялся широкий спектр параметров штормов: $Z_{\max}$ (максимальная радиолокационная отражаемость), ΔH_{25dBZ} , ΔH_{35dBZ} и т.д. по возрастающей значений Z (превышение высоты соответствующего изоконтуров отражаемости над высотой нулевой изотермы), индизировался вид и интенсивность выпадающих осадков, тенденция развития конкретного шторма. В отдельных случаях измерялись некоторые геометрические параметры штормов — например, объемы радиоэха с заданной Z , расстояния между штормами в начальный момент их возникновения и т.д. Плановая структура радиоэха в радиусе наблюдений представлялась в Эйлеровой системе координат (ЭСК), когда в ее центре находился неподвижный радар и в Лагранжевой системе координат (ЛСК), что исключало маскирующее влияние смещения тропосферы и позволяло получать интегральные картины радиоэха (ИК) за определенные промежутки времени или за весь грозоградный процесс в целом [25—27]. Все эти и другие операции позволили изучить тонкую структуру, динамику и кинематику штормов до, в процессе и после их слияния. Для анализа также привлекалась аэрологическая и синоптическая информация. Отдельные методические приемы обработки и анализа, не упомянутые здесь, поясняются по ходу изложения.

Радиолокационные исследования слияния мощных конвективных штормов

Поскольку в нашем исследовании единственным наблюдательным и измерительным инструментом является некогерентный радиолокатор МРЛ-5 с длиной волны 10 см, мы рассмотрим только радиолокационные аспекты слияния штормов. При этом процесс эволюции шторма через слияние его с фидерными ячейками мы

не относим в данном случае к слиянию штормов, т. к. *фидерные ячейки*, хотя и не видны, как правило, радиолокаторами, *являются неотъемлемой частью шторма* [28, 29], без которых шторм, как система взаимодействующих облачных ячеек, существовать не может. Там же нами отмечено, что **шторм — это, скорее всего, не столько объект, сколько процесс**, элементы которого невозможно рассматривать отдельно друг от друга.

Прямым следствием этого утверждения является то, что *феномен слияния шторма с фидерными ячейками составляет основную сущность любого конвективного шторма*, так как он состоит из нескольких ячеек и эволюционирует за счет вхождения в радиолокационное тело шторма новых фидерных ячеек. Важно подчеркнуть, что развитие, *эволюция шторма* за счет слияния с фидерными ячейками *всегда имеет направленность* (вектор эволюции — $\vec{v}$, всегда направлен от шторма к фидерным ячейкам) и *очередность* — сначала со штормом сливается 1-я, ближайшая (ближайшие) к шторму, затем 2-я (вторые) и т.д. [28, 29]. Нарушение очередности означает, как правило, появление нового шторма. Вектор, обозначающий направление и скорость эволюции, мы называем вектором эволюции $\vec{v}$. Только у шторма мы обнаруживаем *направленность эволюции*, а у радиолокационной ячейки ее нет, поскольку она имеет только один цикл развития (возникновение, стадия максимального развития и стадия диссипации), и эти процессы происходят в *одном месте Лагранжева пространства* (на одной квазивертикали в Лагранжевой системе координат). Эти *свойства* и различия (шторма и радиолокационной ячейки), которые мы описали выше, *можно обнаружить только в Лагранжевой системе координат*, применение которой исключает маскирующее влияние смещения средней тропосферы [25—29]. Технически это реализовано в АСУ-МРЛ — «Процедура Лагранжа» [24].

Чтобы определить, принадлежит какое-либо радиоэхо данному шторму или нет, предлагается простой алгоритм, аккумулирующий признаки и различия шторма и радиолокационной ячейки, основанные на наблюдениях многих сотен штормов. *Если радиоэхо обнаруживается на расстоянии далее 8—10 км от радиолокационной границы (с $Z = 45$ dbZ) исследуемого шторма, то оно, скорее всего, является отдельным штормом*. Чтобы полностью убедиться в этом, нужно включить процедуру Лагранжа, входящую в пакет программ АСУ-МРЛ, позволяющую видеть приращения радиоэха в Лагранжевой системе координат, хотя бы для двух-трех последующих циклов обзора РЛС. *Если у исследуемого радиоэха появляется направленное приращение — это новый шторм, если нет — это фидерная ячейка «материнского» шторма*, и она в самое ближайшее время радиолокационно сольется с ним. При этом надо различать приращение радиоэха, связанное с его расширением в горизонтальной плоскости вследствие общего усиления в процессе развития (это выглядит, как *квазиравномерное расширение* в разные стороны), от приращения в каком-то определенном направлении.

Важность разделения случаев слияния фидерных ячеек со штормом от слияния штормов состоит в том, что их *слияние* со штормом, являясь *естественным процессом эволюции* любого шторма и *единственным способом его существования*,

всегда приводит к усилению шторма (на стадии его развития) или к замедлению спада параметров шторма (при общем ослаблении шторма). Разрушение шторма как раз связано с тем, что фидерные ячейки в системе шторма больше не образуются ввиду отсутствия конвективного ресурса. Поэтому и выводы о результатах слияния без разделения статистик на отдельные группы этих объектов (фидерных ячеек и собственно штормов) не отражают физические процессы, связанные со слиянием в разных группах. В работах, где речь идет об искусственных воздействиях на фидерные ячейки, например [17—20], показано, как меняются параметры «слившихся» облаков после воздействия в сравнении с другими облаками, на которые воздействия не проводились. Представляется странным, что в этих исследованиях процесс слияния фидерных ячеек с «материнским» облаком рассматривается как некий особый процесс. И здесь мы вынуждены процитировать авторов [20] со стр. 226, которые при оценке воздействий на них утверждают: «эффект от слияния облаков существенно превосходит тот, который связан с воздействиями на облака. Это означает, что при оценке эффективности воздействий облака, которые в ходе экспериментов сливаются с другими, должны рассматриваться отдельно от основной группы». Если продолжить мысль авторов, то можно представить какую-то особую «основную» группу конвективных облаков, у которых нет фидерных ячеек, и которые развиваются без слияния с такими ячейками, что противоречит самой сути существования любых конвективных штормов.

В дальнейшем изложении мы покажем, что благодаря нашему подходу к разделению объектов на разные группы, будут получены выводы, которые в отдельных аспектах существенно отличаются от общеизвестных [7—20]. Если же мы разделяем типы слияний указанным выше образом, можно обоснованно говорить о слиянии штормов с фидерными ячейками или о слиянии штормов друг с другом, как о совершенно разных явлениях.

В данной работе мы будем исследовать только *слияние штормов*. При этом для анализа были выбраны случаи, когда штормы сливались наиболее мощными своими частями — центральными, с $Z \geq 45$ dBZ. Фактически все анализируемые нами случаи относятся к штормам, в которых индицировался град с разной степенью интенсивности. Процессы образования суперячеек, носовых эхо (bow echo), шквальных линий и кластеров разного масштаба за счет слияния штормов не входит в круг задач настоящего исследования.

Количество слияний более слабых штормов на порядок превышает то, что явилось основой для нашего анализа. Уточним также, что мы выделяем, по крайней мере, два аспекта процесса слияния. Первый — *касание* двух штормов контурами 45 dBZ (область радиоэха, которую мы соотносим с наиболее мощной частью радиоэха, и, главным образом, с центрами восходящих или нисходящих потоков) и, далее, параллельное самостоятельное развитие. Второй — собственно *слияние*, когда максимумы радиоэха штормов становятся слабо различимыми, или неразличимыми, слитными. При этом нельзя рассчитывать на «полное слияние» этих штормов и превращение их в одну радиолокационную ячейку. После таких слияний сохраняются все признаки мультиячейкового шторма. Еще одно важное замечание: мы анализируем *слияние только мультиячейковых штормов*,

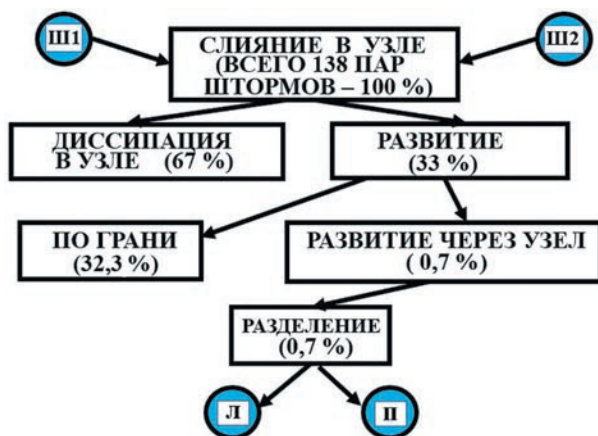


Рис. 1. Соотношение различных типов последствий слияний мощных градовых мультячейковых штормов.

Fig. 1. Ratio of different types of consequences of mergers of powerful hail multicell storms.

поскольку в нашем распоряжении нет случаев слияний, при которых хотя бы один из них был суперячейковым штормом.

На рис. 1 представлена схема, показывающая статистику различных типов последствий слияния мощных градовых мультячейковых штормов по данным АСУ-МРЛ в Молдове. Две трети штормов (67 %) после слияния диссипируют в узле, 33 % штормов после слияния развиваются. Из группы развивающихся штормов 32,3 % (от общего числа штормов) эволюционируют по границам Мезомасштабных Конвективных Ячеек (ММКЯ) или Мезомасштабных Конвективных Линий (ММКЛ), в одном случае (0,7 % штормов) два шторма сначала слились, а затем в этом же узле ММКЯ разделились. Таким образом, получилось две больших группы последствий слияний: диссипация после слияния и развитие после слияния.

Далее на конкретных примерах подробно изучаются многие аспекты слияния штормов и их последствий.

На рис. 2 рассмотрен фрагмент грозоградового процесса от 19.07.2021, который развивался под воздействием холодного фронта окклюзии на фоне периферии гребня антициклона. Сдвиг ветра (рис. 2 в) в слое от земли до 8 км составлял около 2 м/сек/км, направление ветров в этом же слое почти неизменно — с ЮЗ, а ведущий поток (600 гПа) составлял 25 км/час с $A = 254^\circ$. Высота $H_0 = 4,25$ км, $H_{-6} = 5,2$ км, $H_{-22} = 7,5$ км. На рис. 2 а представлены траектории штормов 5 и 6, которые на момент времени 14.33 находились на расстоянии 45 км друг от друга. В процессе развития, смещаясь по своим траекториям (черные жирные стрелки), указанные штормы сближались, и в 15.38 отмечалось «касание», а затем, в 15.41, собственно «слияние». Под «касанием» мы понимаем ситуацию, когда изоконтуры $Z = 45$ dBZ двух штормов первый раз соприкасаются, а под «слиянием»

понимается такая, в которой прежний радиолокационный образ штормов (при $Z \geq 45$ dBZ) утрачен и обретен новый, общий радиолокационный образ. При этом, как мы уже говорили, все признаки мультитачекового шторма сохраняются: локальные максимумы и вершины просматриваются, и их можно отследить во времени. Обратите внимание на вертикальные сечения радиоэха (рис. 2 $z-y$), которые проведены в направлении векторов траекторий. Мы видим, что навесы штормов точно с ними совпадают, что подтверждают результаты, полученные в наших работах [28, 29].

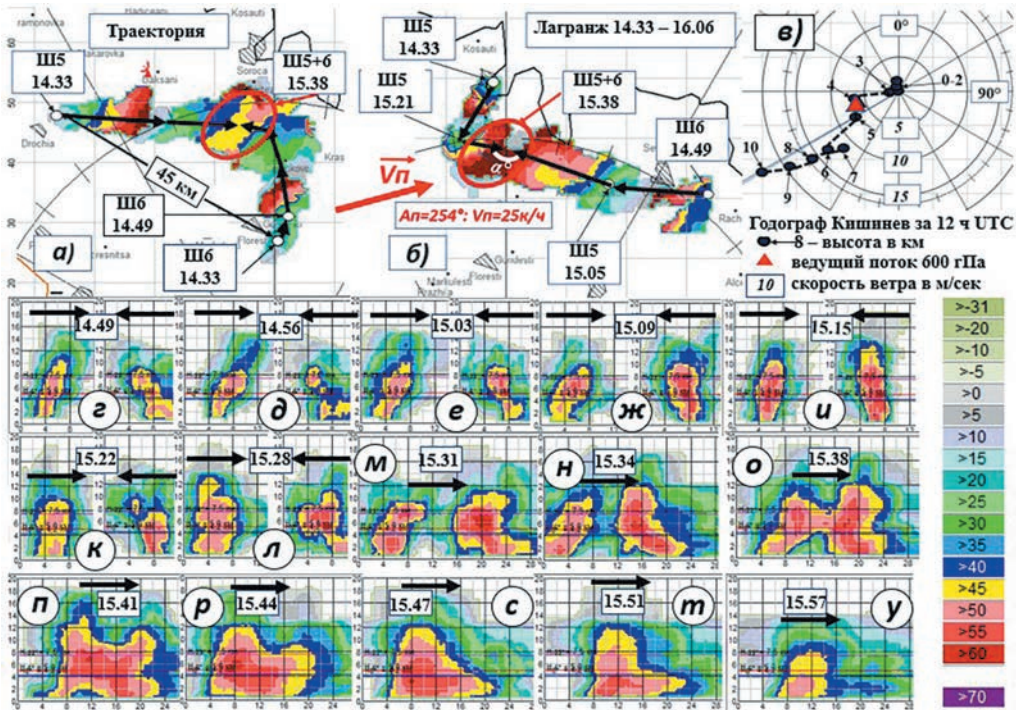


Рис. 2 (начало). Слияние штормов от 19.07.2021:

а) траектории штормов; б) интегральная структура грозоградового процесса с 14.13 по 15.07 (время местное) в Лагранжевой системе координат; все горизонтальные сечения выполнены на высоте, соответствующей температурам от -6 до -10 °C; в) годограф; $z-y$) вертикальные сечения в направлении навесов (черные стрелки указывают направления сечений, совпадающих с векторами $\vec{v}_j$ — черные стрелки на рис. 2 а), на всех вертикальных сечениях шторм 5-й — слева, шторм 6-й — справа.

Fig. 2 (beginning). Merging of the storms from 19.07.2021:

а) storm trajectories; б) integral structure of the TSP from 14.13 to 15.07 (local time) in LSC; all horizontal cross sections are made at the height corresponding to the temperatures from -6 to -10 °C; в) hodograph; $z-y$) vertical cross sections in the canopy direction (black arrows indicate the directions of cross sections coinciding with vectors $\vec{v}_j$ — black arrows in Fig. 2 а), on all vertical sections storm 5 — left, storm 6 — right.

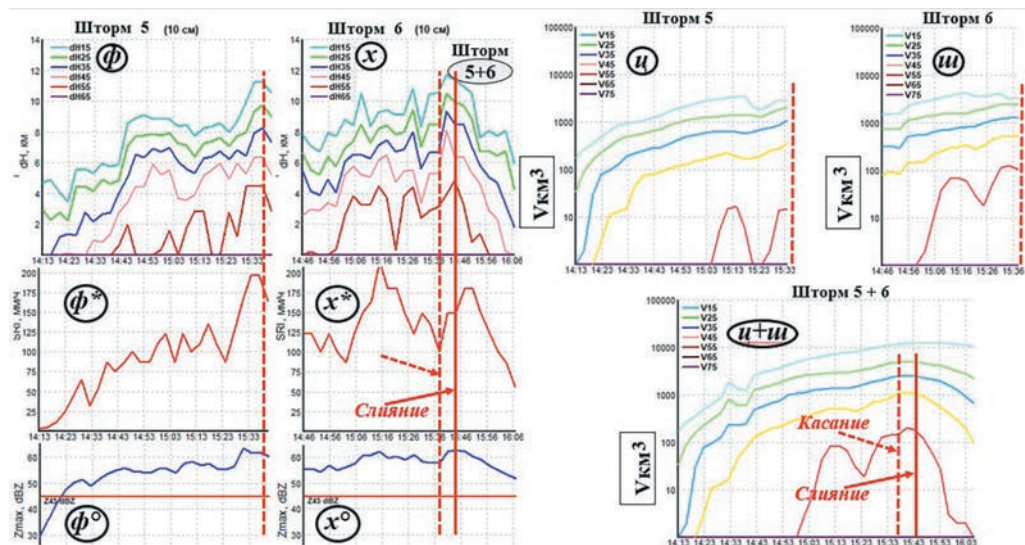


Рис. 2 (окончание). Слияние штормов от 19.07.2021:

ϕ — x) ход параметров ΔNZ ; ϕ^* — x^*) временной ход интенсивности осадков I в мм/час;
 ϕ° — x°) временной ход $Z_{\max}$; u — u), $u+u$) объемы радиоэха штормов V в км³
 (шкала V — логарифмическая).

Fig. 2 (ending). Merging of the storms from 19.07.2021:

ϕ — x) the course of ΔNZ parameters; ϕ^* — x^*) the time course of precipitation intensity I in mm/h;
 ϕ° — x°) the time course of $Z_{\max}$; u — u), $u+u$) the volumes radio echo of the storm — V in км³
 (scale V is logarithmic).

Очевидно, что слияние происходило навстречу навесами радиоэха. Иными словами, сливались в данном случае сначала восходящие потоки штормов, а затем остальное радиоэхо. На рис. 2 б представлена картина сближения и затем слияния двух штормов в Лагранжевой системе координат, с помощью которой можно видеть картину развития процесса слияния в векторах эволюции $\vec{v}_i$. Принцип и технология получения интегральной картины (ИК) в векторах эволюции (Процедура Лагранжа) описаны в работах [25—27]. ИК отображает структуру грозоградового процесса в целом или его фрагмента. Векторы показывают те области Лагранжева пространства, в которых существовала конвекция в течение всего процесса наблюдения за конкретными объектами и те направления, в которых происходило обновление штормов за счет фидерных ячеек [28, 29]. В данном случае «угол сближения» штормов на последнем этапе перед слиянием равен $\approx 175^\circ$ («угол сближения» α° указан на рис. 2 б белой дугой). Под «углом сближения» понимается угол между векторами эволюции двух сближающихся штормов, всегда меньший 180° (векторы эволюции совпадают с центральными осями штормов — рис. 9).

На рис. 2 ϕ и x представлен временной ход параметров ΔNZ (превышение изоконтуров радиоэха с величиной Z_{dBZ} над H_0). Из его анализа видно, что

этот параметр, начиная с момента касания и, особенно, сразу же после слияния, начинает резко падать вплоть до момента полной диссипации слившихся штормов. Это же, в целом, подтверждается ходом параметра $Z_{\max}$ (рис. 2 ϕ° и x°). Небольшое увеличение значения $Z_{\max}$ после слияния мы связываем не с усилением шторма, а, напротив, с его разрушением, т. к. в таких случаях высота $Z_{\max}$ опускается в область выпадения осадков ниже изотермы 0° . Это приводит к частичному таянию твердых частиц осадков (града, крупы), их обводнению и увеличению отражаемости [30]. Этот же эффект подтверждается графиком хода интенсивности осадков I в мм/час (рис. 2 ϕ^* , x^*). Графики изменения полных объемов радиоэха (от поверхности земли до H_v) с различными значениями Z , представленные на рис. 2 z , $ш$, $z+ш$, дополняют описанную выше картину и также указывают на диссипацию шторма после слияния. Особенно хорошо это видно для значений $Z \geq 55$ dBZ (наиболее интенсивной части радиоэха), которые практически безынерционно реагировали на начало и продолжение процесса диссипации радиоэха. В это же время другие значения V (для $Z \leq 45$ dBZ) оказываются достаточно инерционными, и спад объемов несколько замедлен. В любом случае, объем радиоэха, вначале «просуммировав» индивидуальные объемы слившихся штормов, после слияния показывал неуклонное ослабление и диссипацию.

Динамика процесса слияния и его завершение с дальнейшей диссипацией имело место в так называемом «узле» ММКЯ, где сходятся линейные элементы («границы») ММКЯ, о формировании и динамике которых подробно изложено в наших работах [26, 27]. В таких случаях, когда штормы сливаются в узле, часто этот процесс заканчивается их полным разрушением, т. к. при этом для дальнейшего развития шторма условий нет — ему *некуда развиваться*. Правда, сказанное относится только к наиболее распространенной группе слияний — к слиянию штормов с последующей диссипацией (67 % случаев), для другой группы — (33 % случаев) после слияния процесс развития продолжается.

Рассмотрим пример слияния штормов от 04.06.2019. Грозоградный процесс развивался под воздействием холодного фронта с волнами на фоне юго-западной периферии антициклона. Ветер в тропосфере В и ЮВ румбов от 3,5 м/сек у земли до 17,5 м/сек на 10 км. Ведущий поток на высоте 4,3 км — 43 км/ч, $A_p = 140^\circ$. Сдвиг ветра с высотой составлял $\approx 1,4$ м/сек/км. Высота $H_{0^\circ} = 3,5$ км, $H_{-6^\circ} = 4,3$ км, $H_{-22^\circ} = 6,6$ км. В 17.42 расстояние между Ш22 и Ш23 составляло 9 км. Векторы $\vec{v}_{ш}$ — почти параллельны друг другу и направлены против $\vec{v}_n$ (рис. 3 н). На рис. 3 о и р показаны соотношения векторов движения Ш22 и Ш23 соответственно, а на рис. 3 п представлены $\vec{v}_j$ для Ш22 (желтый вектор) и Ш23 (зеленый вектор). Благодаря тому, что зеленый вектор больше, чем желтый, Ш23 «догоняет» Ш22, и происходит процесс слияния. Угол сближения в данном случае равен $\approx 180^\circ$. Обращает на себя внимание то, как реализуется процесс слияния: вначале штормы касаются на высоте около 3,5 км, а затем процесс слияния распространяется вверх и вниз до полной диссипации шторма. Очень интересно и то, что Ш22 и 23 сливаются нисходящими потоками. Это пример того, как два

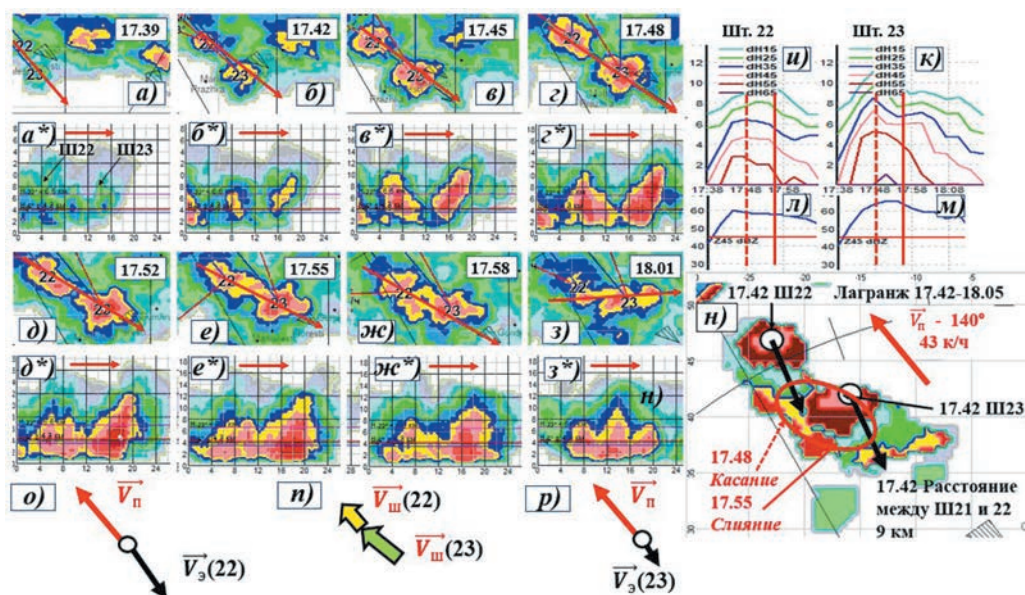


Рис. 3. Слияние штормов 22 и 23 от 04.06.2019:

a—з) горизонтальные сечения; *a*—з**) вертикальные сечения;
u—к) временной ход параметров ΔHZ ; *л—м*) временной ход $Z_{\max}$; *н*) интегральная картина процесса слияния с 17.42 по 18.05 (время местное); *о—р*) схема сложения векторов штормов 22 и 23 соответственно (красный вектор — $\vec{V}_n$, черный — $\vec{V}_3$); *н*) схема получения $\vec{V}_{\text{ш}}$ для шторма 22 (желтый вектор) и шторма 23 (зеленый вектор).
 Цветовая шкала ZdbZ аналогична таковой на рис. 2.

Fig. 3. Merging of the storms 22 and 23 of 04.06.2019:

a—з) horizontal cross sections; *a*—з**) vertical sections; *u—к*) time course of ΔHZ parameters; *л—м*) time course of $Z_{\max}$; *н*) integral picture of merger process from 17.42 to 18.05 (local time); *о—р*) scheme of addition of storm 22 and 23 vectors, respectively (red vector is $\vec{V}_n$, black is $\vec{V}_3$); *н*) scheme of getting $\vec{V}_{\text{ш}}$ for storm 22 (yellow vector) and storm 23 (green vector).

The ZdbZ color scale is similar to that in Fig. 2.

шторма, двигаясь друг за другом по параллельным траекториям, за счет разных скоростей эволюции в конечном итоге «догоняют» друг друга, сливаются, а затем диссипируют.

Ниже приводится пример одновременного слияния трех штормов от 19.05.2019 (рис. 4). Грозоградовый процесс развивался в малоградиентном барическом поле на восточной периферии средневропейского циклона. Ветры в тропосфере от земли до 10 км — юго-восточных румбов от 5 до 9 м/сек. Ведущий поток с $A_p = 150^\circ$, $V_p = 27$ км/ч. Сдвиг ветра по всей тропосфере — меньше 1 м/сек/км (рис. 4 л — годограф). $H_{0^\circ} = 3,6$ км, $H_{-6^\circ} = 4,6$ км, $H_{-22^\circ} = 6,8$ км.

Начало развития Ш16 (в центре), Ш15 (слева) и Ш17 (справа) относится к 18.26, и к 18.29 расстояние между Ш16 и Ш15 составляло 12 км, а в паре Ш16

и Ш17 — 10 км. При этом видно, что это три разных объекта. Углы сближения Ш16 со Ш17, а также Ш16 со Ш15 составили соответственно $\approx 135^\circ$ и почти 180° (рис. 4 *и*). Попарное слияние указанных штормов происходило, практически, одновременно. Касание штормов было на высотах 4—5 км, а процесс слияния постепенно охватывал всю толщу облакообразования от верхних слоев к нижним. На протяжении почти всего периода слияния индивидуальные признаки штормов (индивидуальные вертикали с вершинами, положение относительных $Z_{\max}$) четко различались, и только в самом конце процесса диссипации индивидуальные признаки утрачивались. На вертикальных сечениях (особенно рис. 4 *з**) и ходе параметров ΔHZ и $Z_{\max}$ (рис. 4 *м—с*) видно, что Ш16 был к моменту касания и слияния самым мощным из трех (самые высокие значения ΔHZ_{45dBZ} достигали 8 км, ΔHZ_{55dBZ} — 4,6 км, а ΔHZ_{65dBZ} — 2,4 км), в котором формировался град с ущербом. В результате слияния объединенный шторм не усилился, а, напротив, начал быстро разрушаться.

Рисунки 4 *т—ф*, описывающие ход интенсивности осадков, также показывают, начиная с момента касания и затем слияния, резкий рост интенсивности осадков I (особенно в самом мощном Ш16) связан именно с процессом выпадения мощных градовых осадков, которые в процессе таяния ниже изотермы 0° покрываются пленкой воды, что увеличивает отражение.

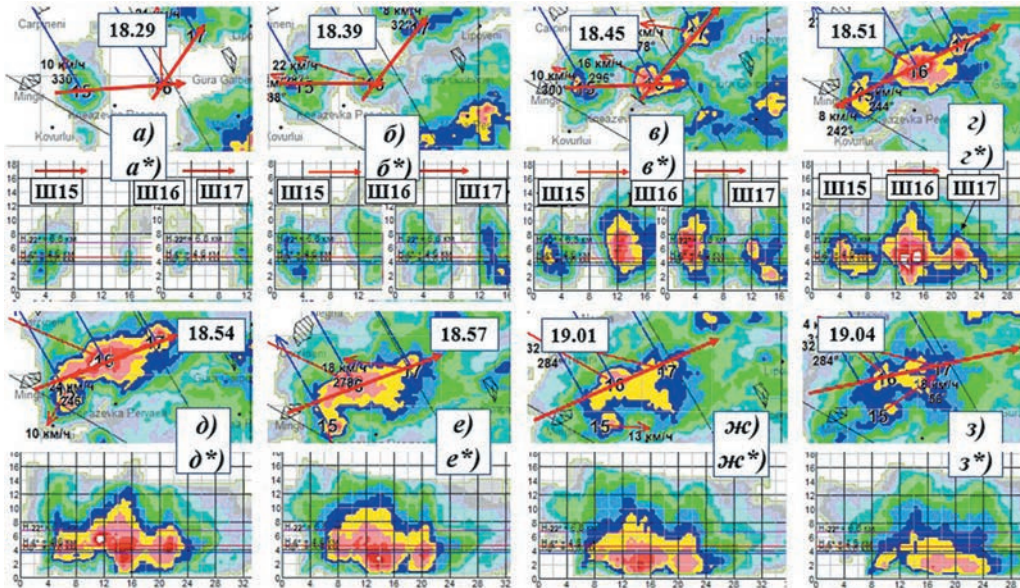


Рис. 4 (начало). Слияние трех штормов: 15, 16 и 17 от 19.05.2019:

а—г) горизонтальные сечения; *а*—г**) вертикальные сечения.

Fig. 4 (beginning). Merging of three storms: 15, 16 and 17 of 19.05.2019:

а—г) horizontal cross sections; *а*—г**) vertical sections.

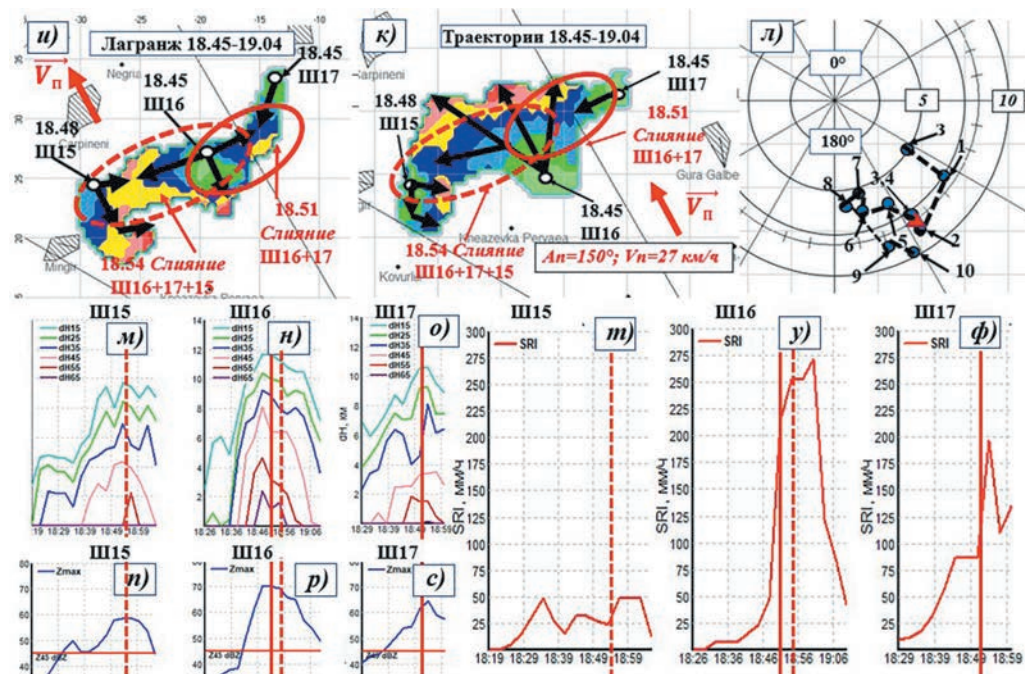


Рис. 4 (окончание). Слияние трех штормов: 15, 16 и 17 от 19.05.2019:

и) фрагмент интегральной картины (Лагранжева система координат) в период с 18.45 по 19.04;
к) траектории штормов; л) годограф Кишинев за 12 часов UTC; м—о) ход параметров ΔHZ ;
п—с) ход параметра Z_{max} ; т—ф) ход параметра I (интенсивности осадков в мм/ч).

Fig. 4 (ending). Merging of three storms: 15, 16 and 17 of 19.05.2019:

и) fragment of the integral picture (Lagrangian coordinates system) between 18.45 and 19.04;
к) storm trajectories; л) Kishinev hodograph for 12 hours UTC; м—о) course of ΔHZ parameters;
п—с) course of Z_{max} parameter; т—ф) course of parameter I (precipitation intensity in mm/h).

Далее мы продемонстрируем различные типы слияний, происходящих в узле ММКЯ, которые связаны не с диссипацией, а, напротив, с развитием.

Вначале рассмотрим ГТП от 23.07.2014 в Республике Молдова, который развивался под влиянием фронта окклюзии, проходившего по югу Молдовы на фоне черноморского циклона (рис. 5). Ветры в тропосфере слабые от 4 до 8 м/сек ЮВ и Ю румбов. Сдвиг ветра с высотой менее 1 м/с. Ведущий поток с $A_p = 180^\circ$, $V_p = 24$ км/ч. $H_0 = 3,6$ км, $H_{-6^\circ} = 4,5$ км, $H_{-27^\circ} = 7,0$ км. Расстояние между Ш70 и Ш71 в момент возникновения последнего в 15.24 составляло 14 км. Ш70 развивался в ЗЮЗ направлении, а Ш71 — в ВСВ направлении, угол сближения равнялся $\approx 150^\circ$. К моменту касания, а затем слияния в 16.55 оба шторма имели градовые параметры, и после слияния шторм продолжал развиваться. Слияние началось со средних уровней и распространялось вверх и вниз, а после слияния шторм, изменив направление, продолжил развитие в ЮЮВ направлении по грани ММКЛ вплоть до полной диссипации в 17.28, что подтверждает временной ход всех параметров (ΔHZ , Z_{max} , I).

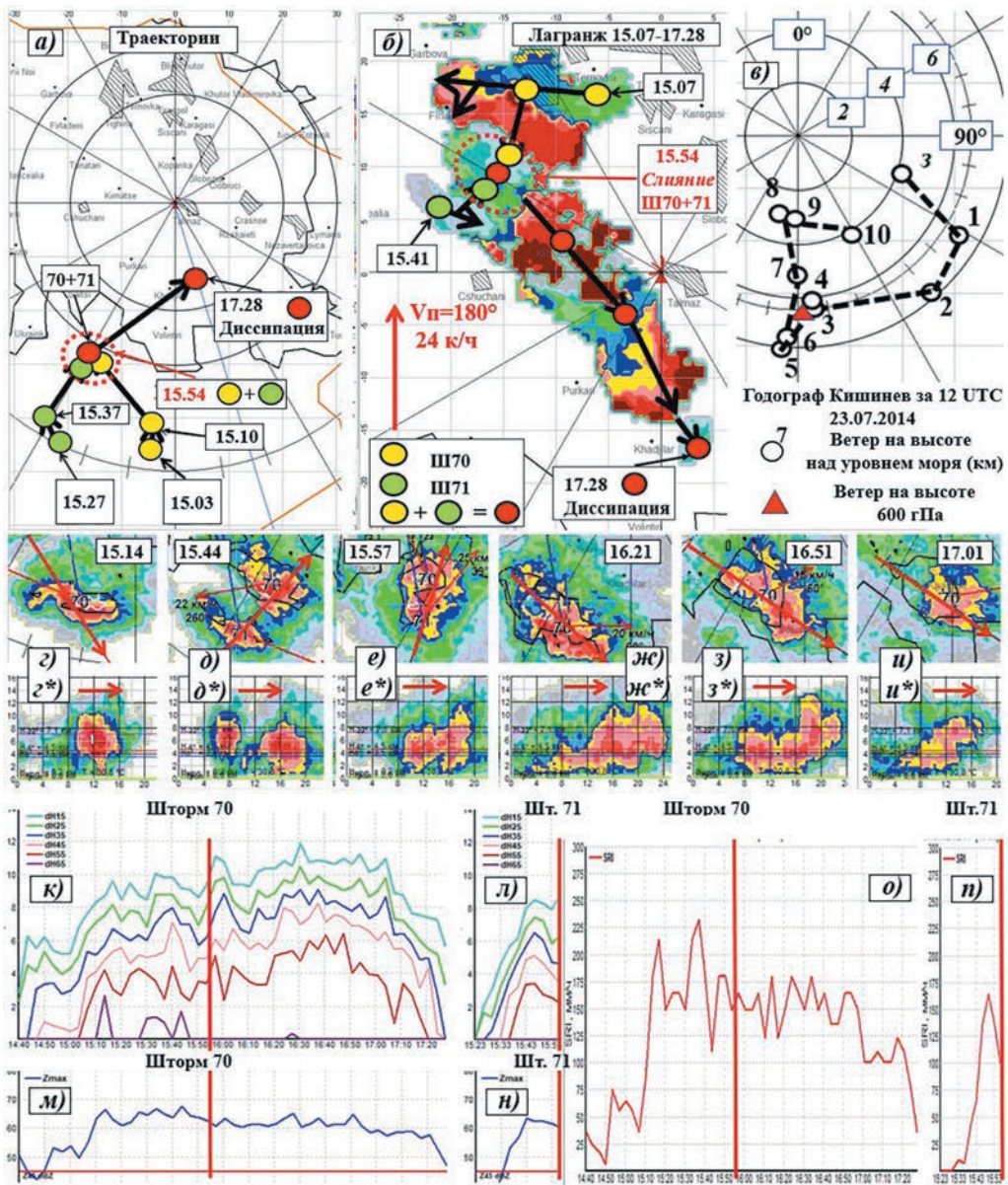


Рис. 5. Слияние штормов 70 и 71 от 23.07.2014:

а) траектории штормов; б) фрагмент интегральной структуры грозоградового процесса с 15.07 по 17.28; в) годограф, круги проведены через 2 м/с; г—и) горизонтальные сечения; ж*—и*) вертикальные сечения; к—л) ход параметров ΔHZ ; м—н) ход параметра Z_{max} ; о—п) ход параметра I (интенсивности осадков в мм/ч).

Fig. 5. Merging of the storms 70 and 71 from 23.07.2014:

а) storm trajectories; б) fragment of the integral structure of thunderstorm prozess from 15.07 to 17.28; в) hodograph, circles drawn at 2 m/s; г—и) horizontal sections; ж*—и*) vertical sections; к—л) travel of ΔHZ parameters; м—н) travel of Z_{max} parameter; о—п) travel of parameter I (rainfall intensity in mm/h).

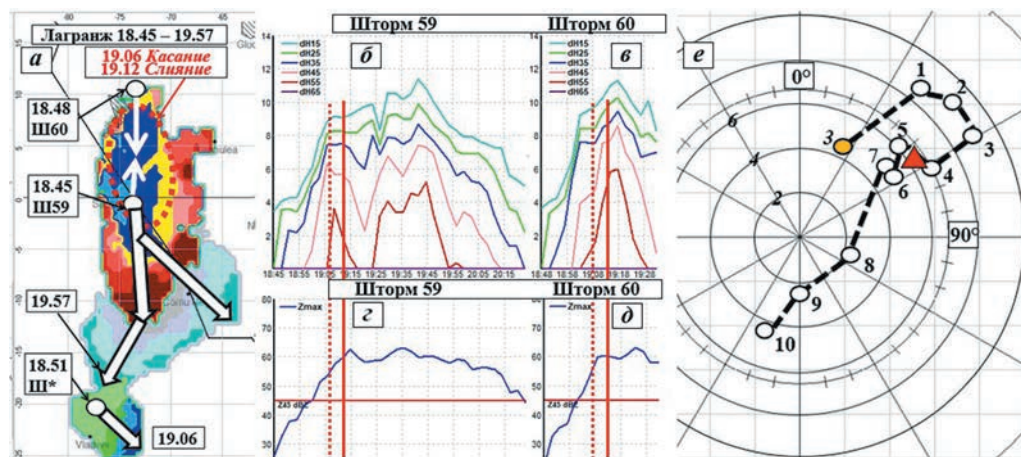


Рис. 6. Слияние штормов 59 и 60 от 06.06.2014:

а) интегральная структура грозоградового процесса с 18.45 по 19.57:
б—в) ход параметров ΔH_2 : з—д) ход параметра $Z_{\max}$; е) годограф Кишинев от 15.00 UTC.

Fig. 6. Merging of storms 59 and 60 from 06.06.2014:

а) integral structure of the thunderstorm process from 18.45 to 19.57: б—в) course of parameters ΔH_2 :
з—д) course of parameter $Z_{\max}$; е) hodograph of Kishinev from 15.00 UTC.

Развитие грозоградового процесса от 06.06.2014, представленное на рис. 6, проходило под влиянием холодного фронта с волнами, который сформировался в северной ложбине черноморского циклона. Ветры северо-восточных румбов от земли до 7 км варьируют от 4,5 до 9 м/с, а выше 7 км уменьшаются до 4 м/с. Таким образом, сдвиг ветра в слое до 7 км менее 1 м/с/км, а выше, вплоть до 10 км, сдвиг меняет знак и составляет менее -1 м/с/км; $H_{0^\circ} = 3,5$ км, $H_{-6^\circ} = 4,5$ км, $H_{-22^\circ} = 6,9$ км. Ведущий поток: $A_p = 55^\circ$, $V_p = 23$ км/ч. Развитие Ш59 и Ш60 началось примерно в одно время, и расстояние между ними составляло 11 км. После слияния около 19.12 (угол сближения $\approx 180^\circ$) оба шторма ослабли, однако уже через 10 мин объединенный шторм (Ш59) вновь усилился и развивался на юг, вплоть до полной диссипации в 19.56. Обращает на себя внимание то, что место диссипации Ш59 находится как раз там, где более чем за 70 мин до этого возник, а затем разрушился Ш*. Таким образом возле этого места мы отмечаем «фантом» Ш*. Опыт наблюдения за развитием мезо-β-масштабных структур в Лагранжевой системе координат показывает, что любой шторм, подходя к месту, где ранее находился какой-либо радиолокационный объект, обязательно разрушится и это правило позволяет в таких ситуациях прогнозировать место и время диссипации штормов практически со 100%-ной вероятностью [26, 27].

На рис. 7 представлен фрагмент грозоградового процесса от 05.08.2014, который развивался под влиянием фронта окклюзии на фоне передней части черноморской депрессии. Ветры по высотам слабые — не превышали 5,5 м/с до высоты 10 км переменных направлений. Ведущий поток: $A_p = 319^\circ$, $V_p = 9$ км/ч, сдвиг

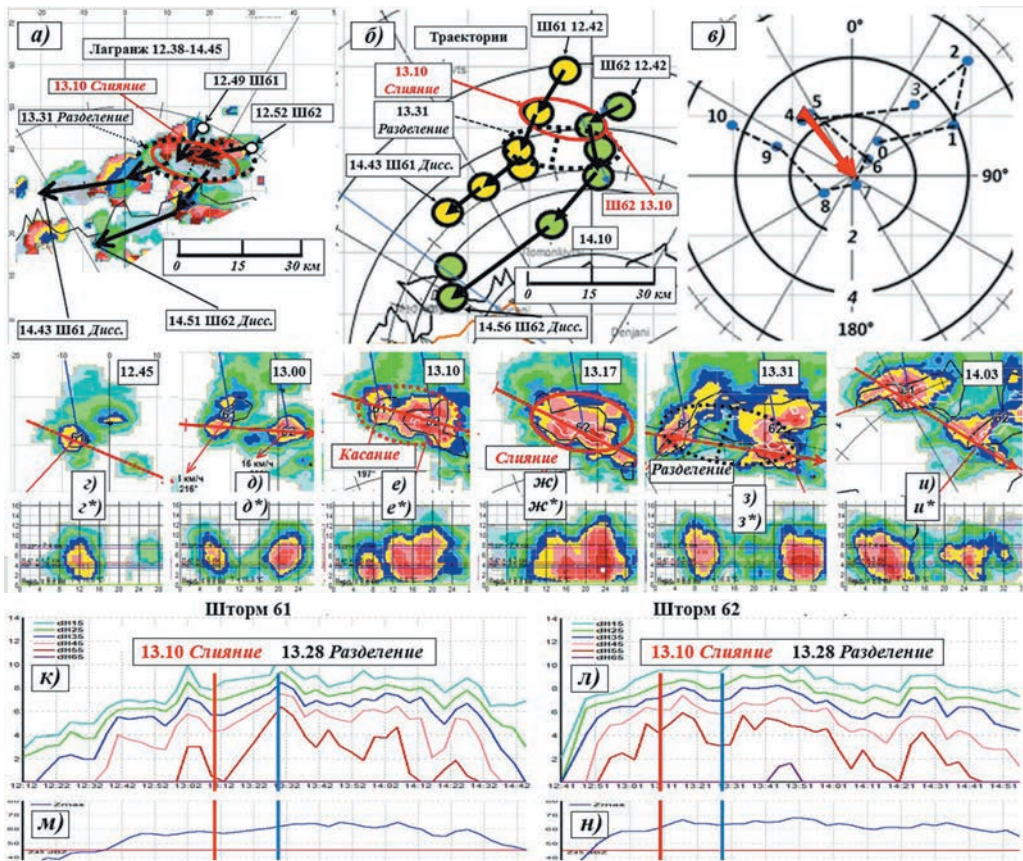


Рис. 7: а) фрагмент интегральной картины грозоградового процесса от 05.08.2014 за период с 12.38 по 14.45 (время местное) в Лагранжевой системе координат; б) траектории штормов; в) годограф Бричаны (север Молдовы) за 12 UTC, круги проведены через 2 м/с; г—и) горизонтальные, а г*—и*) вертикальные сечения штормов; к—л) ход параметров ΔHZ ; м—н) ход параметра Z_{max} .

Fig. 7: а) fragment of the integral thunderstorm process (IP) picture from 05.08.2014 for the period from 12.38 to 14.45 (local time) in Lagrangian coordinates system; б) storm trajectories; в) Briceni (north of Moldova) hodograph for 12 UTC, circles drawn at 2 m/s; г—и) horizontal, and г*—и*) vertical storm sections; к—л) progress of ΔHZ parameters; м—н) progress of Z_{max} parameter.

ветра — менее 1 м/с/км. В 12.42, когда оба шторма фиксировались одновременно, расстояние между ними было 16 км. На рис. 7 а и б представлены интегральная картина (ИК в ЛСК) и траектории Ш61 и Ш62 соответственно, из которых видно, как эти шторма постепенно сближались. В результате в 13.10 отмечалось касание, а к 13.17 — слияние штормов, при этом индивидуальные свойства (вершины изоконтуров Z , положения Z_{max}) не были полностью утрачены. Слившийся Ш61+62

усилился, что видно по параметрам ΔHZ и $Z_{\max}$. Кроме того, и это следует подчеркнуть, Ш61+62, находясь в узле ММКЯ, перестал смещаться (в ЛСК), т. е. его скорость эволюции $\vec{v}_s \approx 0$. Шторм оставался в одном и том же месте Лагранжева пространства до 13.31, когда было отмечено *разделение* штормов, и в дальнейшем они стали смещаться по разным траекториям со скоростями эволюции $\vec{v}_s$ до 25—29 км/ч. После разделения штормы продолжали развиваться, и к 13.48 Ш62 имел максимальное за все время существования значение $Z = 68$ dBZ. Необходимо подчеркнуть, что *разделяющийся мультитячейковый* шторм — довольно редкое явление, которое, вообще говоря, противоречит известной гипотезе о разделении исключительно суперячейковых штормов при специфической структуре ветра и сдвиге ветра с высотой, взаимодействующих с вращающимся восходящим потоком [31, 32]. В наших работах [26, 27] на конкретном примере впервые было показано, что могут иметь место разделения мультитячейковых штормов в малоподвижной и слабосдвиговой тропосфере (сдвиг ветра менее 1 м/с/км). Данный пример является убедительным тому подтверждением. Здесь мы отмечаем также *двойной феномен: после слияния* штормов в узле ММКЯ через некоторое время *в этом же узле* произошло *разделение* штормов, после чего штормы продолжали движение по своим траекториям и усиливались. Двойной феномен (слияние—разделение) ранее в литературе не отмечался. Таким образом, данный случай дополняет коллекцию возможных вариантов развития штормов в узлах ММКЯ до 6 [26, 27].

Грозоградовый процесс от 01.06.2019 — это пример, когда при сближении Ш42 и Ш43 отмечено только их касание. На графиках хода параметров ΔHZ (рис. 8 в, г) видно, что Ш42 за 20 мин до момента касания начал ослабевать и после касания этот шторм диссипировал через 18 мин, в то время как Ш43 продолжал развиваться еще в течение 80 мин, периодически усиливаясь и ослабевая. Этот случай один из многих, показывающий процесс «стыковки» сближающихся линий конвергенции (границ ММКЯ и/или ММКЛ), при котором *никогда не происходит их пересечения*. Эта закономерность является следствием более общей, описанной в работе [27], которая заключается в том, что конвекция в одном и том же месте Лагранжева пространства реализуется только один раз. Эта закономерность (правило) является наиболее общим и основополагающим предиктором для прогнозирования времени и места диссипации штормов или времени и места их слияния. Один из таких примеров мы привели на рис. 6 (грозоградовый процесс от 06.06.2014), когда Ш60 приблизился к месту, где за 70 мин до этого развивался Ш*. В результате Ш60 разрушился, не пересекая траекторию «фантома» Ш*.

Двойной феномен (слияние—разделение) и приводившаяся выше в ссылка на фрагмент ГТП от 22.06.2019 [26, 27], когда имел место феномен продолжительного развития мощного конвективного шторма в узле при $\vec{v}_s \approx 0$, ставят перед нами важный вопрос: за счет каких ресурсов и механизмов реализуются эти феномены? Более того, возможно, в первом приближении мы говорим об обнаружении *нового типа* мощного конвективного шторма, развитие которого осуществляется *только в рамках узла ММКЯ*. Какие иные возможные механизмы, помимо известных, реализуются для существования и обновления таких штормов? Но это уже тема для отдельного исследования, которое нами планируется.

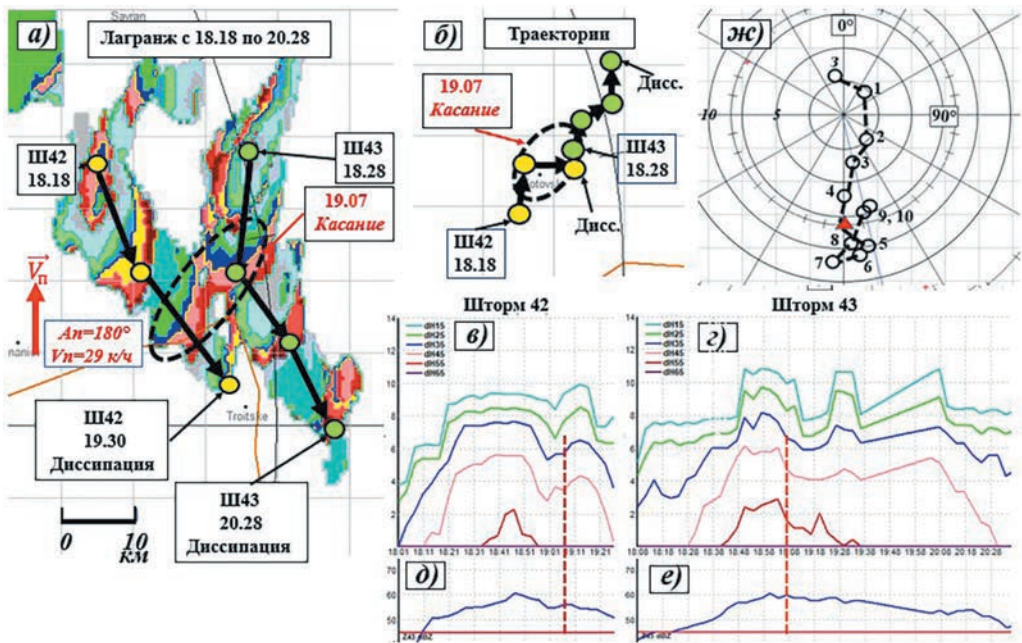


Рис. 8. Касание штормов — грозоградовый процесс от 01.06.2019:

а) интегральная картина (Лагранжевой системе координат); б) траектории;
 в—г) ход параметров ΔNZ ; д—е) ход параметра Z_{max} ;
 ж) годограф Кишинев за 12.00 UTC, круги проведены через 2,5 м/с.

Fig. 8. Touching storms — Thunderstorm prozess from 01.06.2019:

а) integral picture (Lagrangian coordinates system); б) trajectories; в—г) course of ΔNZ parameters;
 д—е) course of Z_{max} parameter; ж) Kishinev hodograph for 12.00 UTC, circles drawn at 2.5 m/s.

При рассмотрении процесса сближения штормов обнаруживается, что сливаются штормы, образовавшиеся изначально на больших расстояниях друг от друга: от 9 до 45 км (грозоградовый процесс от 19.07.2021). Вряд ли в этих случаях можно представить себе механизмы слияния, связанные с взаимодействиями на малых расстояниях, о которых шла речь во введении [7—21]. Можно предположить, что такие механизмы работают в системе шторм — фидерные ячейки. Когда же речь идет о взаимодействии штормов, находящихся на расстояниях, значительно больших, чем средний диаметр радиолокационной ячейки, т. е. более 5—6 км, этим механизмом, по нашему мнению, является мезо-β-масштабная конвергенция, стимулирующая восходящие движения в масштабах, превышающих масштаб шторма. Такая конвергенция реализуется в виде полигональных мезомасштабных структур — ММКЯ и/или мезомасштабных линейных структур — ММКЛ [25—29].

На рис. 9 а приводится схема мультячейкового шторма, важнейшим и неотъемлемым элементом которого является линия фидерных облаков (ЛФО — Flanking Line). Чаще всего она радаром не просматривается. Лишь в редких случаях удавалось ее обнаружить с помощью РЛС, например в [28, 29], в штормах 61 и 62

(грозоградовый процесс от 05.08.2014) и, особенно, в работе [5], где при наблюдении суперячейки в южной Венгрии удалось «в одном кадре» зафиксировать шторм и его ЛФО, что является уникальным случаем. В работах [26—29] нами показано, что ЛФО формируется на линиях конвергенции, т. е. на гранях ММКЯ и/или ММКЛ. Конвективные штормы «проживают» свою жизнь, развиваясь по этим граням и внутри узлов. Было показано, в частности [26, 27], что разделение штормов, изломы траекторий штормов происходят в узлах. Из проведенного нами анализа 138 слияний штормов, шесть из которых рассмотрены в данном исследовании (плюс один пример касания штормов), становится очевидным, что и феномен слияния связан с развитием штормов по граням и в узлах. Исходя из этого, высказывается гипотеза о механизме слияния конвективных штормов, которая отображена на рис. 9.

Процесс слияния двух штормов представляется как пересечение, натекание друг на друга ЛФО двух сближающихся штормов. Важно напомнить, что ЛФО означает линию, на которой уже существует конвекция в виде *Cu cong.* а, значит, в каждой из фидерных ячеек уже существуют восходящие потоки и процесс облако-и-осадкообразования запущен. При натекании ЛФО друг на друга можно ожидать усиление конвекции (облако-и-осадкообразования) а также ускорения проявления, «слияния» ранее невидимых, а теперь усилившихся, ставшими радиоэхом, «бывших» фидерных ячеек. При этом угол сближения α° , образованный сходящимися «центральными осями» штормов (пунктирные линии), может быть разным:

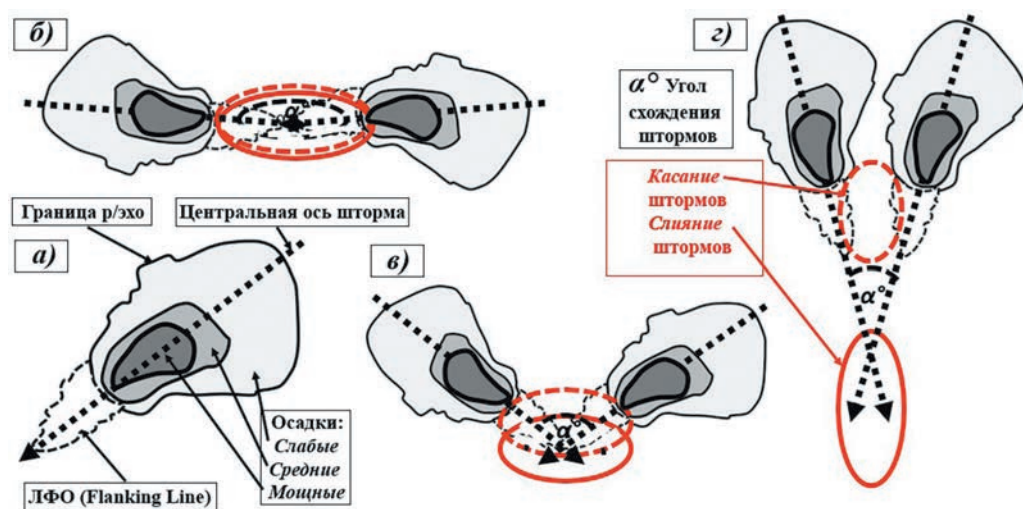


Рис. 9. Гипотеза слияния штормов:

а) схема мультячейкового шторма;
б—г) схемы слияния штормов в зависимости от угла схождения α° .

Fig. 9. Storm merger hypothesis:

а) scheme of the multicell storm; б—г) storm merger schemes depending on the convergence angle α° .

на рис. 9 б и г представлены предельные их значения, а на рис. 9 в — промежуточное. В зависимости от этого процессы «касания» и «слияния» отстоят друг от друга как в пространстве, так и во времени: при больших углах α° обычно место и время «касания» и «слияния» близки, при малых углах — удалены. Иногда, при малых α° , процесс сближения штормов ограничивается только «касанием». Иногда, при $45^\circ < \alpha^\circ < 180^\circ$, можно наблюдать, как в результате взаимодействия двух ЛФО между сближающимися штормами появляется «отдельно стоящее» радиоэхо (в рассмотренных нами примерах, такой случай не приведен), которое не соприкасается ни с каким другим даже на уровне самых малых значений Z , а в последствии может явиться своеобразным «мостом» для слияния теперь уже трех штормов одновременно. Можно видеть, что при больших α° приближение ЛФО друг к другу означает более быстрое «проявление» мест их сопряжения *по всей длине ЛФО*, что часто наблюдается как почти единовременное проявление довольно протяженного, линейно вытянутого общего радиоэха. Такие явления особенно наглядно можно обнаружить при образовании линии шквалов. Впрочем, это тема для отдельного исследования.

Некоторые статистические обобщения собранного нами материала предполагается оформить в виде отдельного исследования, в котором, возможно, будут определены прогностические предикторы и даны алгоритмы для сверхкраткосрочных прогнозов, как для фактов слияния, так и последствий слияний: развития или диссипации штормов.

Выводы

В результате исследования удалось разделить имеющийся статистический материал о слиянии конвективных объектов на две категории: мощных конвективных штормов с его же фидерными ячейками и мощных конвективных штормов друг с другом. Получен массив данных из 138 случаев *слияния штормов* на и вблизи территории Молдовы. Это стало реальным в результате предложенного авторами алгоритма, использующего возможности отслеживания развития штормов, в том числе, и в Лагранжевой системе координат.

1. Впервые показано, что все слияния конвективных штормов и последствия их слияний связаны с их развитием на элементах мезо- β -масштабных структур: ММКЯ и/или ММКЛ, которые диктуют направление и степень развития штормов, предопределяя их жизненный цикл.

2. Впервые установлено, что для территории Молдовы и прилегающих районов в 67 % случаев слияние штормов приводит к разрушению объединенного шторма, а в 33 % случаев объединенные штормы продолжают развиваться или внутри узла, или на грани ММКЯ, и/или ММКЛ.

3. Впервые наблюдался конвективный феномен, когда два шторма слились в узле, и объединенный шторм, не выходя за пределы узла ($\vec{v}_z \approx 0$), усилился и через некоторое время разделился на два шторма, которые продолжили движение по расходящимся траекториям. Этот двойной феномен (слияние — разделение в узле) дополняет коллекцию типов развития штормов в узлах до 6.

4. Высказана гипотеза о причинах и механизме слияния конвективных штормов, заключающаяся в том, что конвективные штормы, неотъемлемым элементом которых являются линии фидерных облаков (ЛФО — Flanking Line), в процессе сближения по линиям (граням) мезомасштабных структур пересекаются между собой, что приводит к ускорению развития фидерных ячеек и часто к взрывному слиянию штормов. Угол сближения и взаимное расположение штормов на траектории также являются факторами, влияющими на слияние и его последствия.

5. Для исключения неправильного толкования результатов активных воздействий по борьбе с градом, изменения режима осадков (увеличения или их подавления), а также при учете экономической эффективности таких технологий для каждого региона необходимо учитывать вероятность естественного исхода слияний конвективных штормов (для Молдовы 67 % штормов диссипируют, 33 % — продолжают развитие).

Список источников

1. Foot G. B., Frank H. W. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements // J. Atmos. Sci. 1983. Vol. 40. P. 686—707. doi: 10.1175/1520-0469(1983)040<0686:CSO-AHI>2.0.CO;2.
2. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Баркова М. В., Малкарова А. М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик, 2014. 500 с.
3. Doswell III C. A., Burgess D. W. Tornadoes and Tornadoic Storms. A Review of Conceptual Models // Environmental Science. 1993. P. 1—14. doi: 10.1029/GM079p0161.
4. Krauss T. W., Marwitz J. D. Precipitation Process within an Alberta Supercell Hailstorm // J. of the Atmospheric Sciences. 1984. Vol. 46. P. 1025—1035. doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<1025:PPWAAS>2.0.CO;2.
5. Simon A., Putsay M., Kocsis Z. Case studies of various types of storms using satellite, radar and lightning data // Convection Working Group Workshop, Ljubljana, Slovenia. 17—19 April 2018.
6. Bluestein H. B. Visual aspects of the flanking line in severe thunderstorms // Mon. Wea. Rev. 1986. Vol. 114. P. 788—795. doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<0788:VAOTFL>2.0.CO;2.
7. Westcott N. E., Kennedy P. C. Cell Development and Merger in an Illinois Thunderstorm Observed by Doppler Radar // J. Atmos. Sci. 1989. Vol. 46. P. 117—131. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<0117:CDA-MIA>2.0.CO;2.
8. Westcott N. E. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging and subsequent growth // Mon. Wea. Rev. 1994. Vol. 122. P. 780—790. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<0780:MOCCCI>2.0.CO;2.
9. Fu D., Guo X. A Cloud-Resolving Simulation Study on the Merging Processes and Effects of Topography and Environmental Winds // J. of the Atm. Sci. 2011. Vol. 69. P. 1232—1249. doi: 10.1175/JAS-D-11-049.1.
10. Tao W.-K., Simpson J. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses // J. Atmos. Sci. 1989. Vol. 46. P. 2974—3004. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<2974:AFSOCI>2.0.CO;2.
11. Lin Y.-L., Joyce L. E. A further study of the mechanisms of cell regeneration, propagation, and development within two-dimensional multicell storms // J. Atmos. Sci. 2001. Vol. 58. P. 2957—2988. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<2957:AFSOTM>2.0.CO;2.
12. Lee B. D., Jewett B. F., Wilhelmson R. B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation // Wea. Forecasting. 2006. Vol. 21. P. 433—448. doi: 10.1175/WAF944.1.
13. Gauthier M., Petersen W. A., Carey L. Cell mergers and their impact on cloud-to-ground lightning over the Houston area // Atmospheric Research. 2010. Vol. 96. P. 626—632. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.02.010.
14. Lu J., Qie X., Jiang R., Xiao X. Lightning activity during convective cell mergers in a squall line and corresponding dynamical and thermodynamical characteristics // Atmospheric Research. 2021. 256. 105555. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105555.

15. Carey L. D., Petersen W. A., Rutledge S. A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998 // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 1811—1831. doi: 10.1175/2566.1.
16. Simpson J., Keenan T. D., Ferrier B., Simpson R. H., Holland G. J. Cumulus mergers in the maritime continent region // *Meteor. Atmos. Phys.* 1993. Vol. 51. P. 73—99. doi: 10.1007/BF01080881.
17. Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S. Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia. JKAU // *Met., Env. & Arid Land Agric. Sci.* 2011. Vol. 22. P. 23—39 (2011 A.D./1432 A.H.). doi: 10.4197/Met. 22-2.2.
18. Sinkevich A., Krauss T. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging // *Atmospheric Research*. 2014. Vol. 142. P. 124—132. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.06.007.
19. Синькевич А. А., Краус Т. В. Воздействия на облака в Саудовской Аравии, статистическая оценка результатов // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 6. С. 26—37.
20. Синькевич А. А., Довгальюк Ю. А., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П. Слияние конвективных облаков. СПб.: ООО «Амирит», 2018. 280 с.
21. Stalker J. R., Knupp K. R. Cell merger potential in multicell thunderstorms of weakly sheared environments: Cell separation distance versus planetary boundary layer depth // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 1678—1695. doi: 10.1175/2556.1.
22. Dixon M., Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting — A radar-based methodology // *J. Atmos. and Oceanic Technol.* 1993. Vol. 10. P. 785—797. doi: 10.1175/1520-0426(1993)010%3C0785:TTITAA%3E2.0.CO;2.
23. Абдуллаев С. М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России // *Метеорология и Гидрология*. 2012. № 1. С. 20—32.
24. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Котелевич А. Ф., Сирота Н. В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормоповещения и активного воздействия на облачные процессы // *Сб. Тр. XXVII Всеросс. Симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред»*. СПб., 2011. С. 211—225.
25. Старостин А. Н., Лившиц Е. М., Швецов В. С. Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков в Молдавии // *Метеорология и Гидрология*. 1983. № 10. С. 55—59.
26. Лившиц Е. М., Петров В. И. Разделение конвективных штормов. Часть I. Динамика и кинематика // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 65. С. 648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670.
27. Лившиц Е. М., Петров В. И. Разделение конвективных штормов. Часть II. Организация мезомасштабной структуры грозоградового процесса // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 66. С. 20—41. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670.
28. Лившиц Е. М., Петров В. И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть I. Основные векторы движения и их соотношение в мощных градовых штормах // *Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Процессы*. Нальчик. 2021. С. 192—198.
29. Лившиц Е. М., Петров В. И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть II. Результаты исследования. Выводы // *Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Процессы*. Нальчик, 2021. С. 198—204.
30. Калов Х. М., Калов Р. Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозоградовые облака и туманы. Нальчик, 2010. 219 с.
31. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation // *Mon. Weather Rev.* 1981. Vol. 109. P. 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
32. Klemp J. B. Dynamics of tornadic thunderstorms // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987. Vol. 19. P. 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.

References

1. Foot G. B., Frank H. W. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements. *J. Atmos. Sci.* 1983;(40):686—707. doi: 10.1175/1520-0469(1983)040<0686:CSOA-HI>2.0.CO;2.
2. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Barekova M. V., Malkarova A. M. *Rukovodstvo po organizazii i provedeniy protivogorodovoykh rabot = Guidelines for organizing and conducting anti-hail operations*. Nalchik, 2014: 500 p. (In Russ.).

3. Doswell III C. A., Burgess D. W. Tornadoes and Tornadic Storms. *A Review of Conceptual Models. Environmental Science*. 1993;1—14. doi: 10.1029/GM079p0161.
4. Krauss T. W., Marwitz J. D. Precipitation Process within an Alberta Supercell Hailstorm. *J. of the Atmospheric Sciences*. 1984;(46):1025—1035. doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<1025:PPWAAS>2.0.CO;2.
5. Simon A., Putsay M., Kocsis Z. Case studies of various types of storms using satellite, radar and lightning data. Convection Working Group Workshop, Ljubljana, Slovenia. 17—19 April 2018.
6. Bluestein H. B. Visual aspects of the flanking line in severe thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.* 1986;(114):788—795. doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<0788:VAOTFL>2.0.CO;2.
7. Westcott N. E., Kennedy P. C. Cell Development and Merger in an Illinois Thunderstorm Observed by Doppler Radar. *J. Atmos. Sci.* 1989;(46):117—131. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<0117:CDA-MIA>2.0.CO;2.
8. Westcott N. E. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging and subsequent growth. *Mon. Wea. Rev.* 1994;(122):780—790. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<0780:MOCCCI>2.0.CO;2.
9. Fu D., Guo X. A Cloud-Resolving Simulation Study on the Merging Processes and Effects of Topography and Environmental Winds. *J. of the Atm. Sci.* 2011;(69):1232—1249. doi: 10.1175/JAS-D-11-049.1.
10. Tao W.-K., Simpson J. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses. *J. Atmos. Sci.* 1989;(46):2974—3004. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<2974:AFSOCI>2.0.CO;2.
11. Lin Y.-L., Joyce L. E. A further study of the mechanisms of cell regeneration, propagation, and development within two-dimensional multicell storms. *J. Atmos. Sci.* 2001;(58):2957—2988. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<2957:AFSOTM>2.0.CO;2.
12. Lee B. D., Jewett B. F., Wilhelmson R. B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation. *Wea. Forecasting*. 2006;(21):433—448. doi: 10.1175/WAF944.1.
13. Gauthier M., Petersen W. A., Carey L. Cell mergers and their impact on cloud-to-ground lightning over the Houston area. *Atmospheric Research*. 2010;(96):626—632. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.02.010.
14. Lu J., Qie X., Jiang R., Xiao X. Lightning activity during convective cell mergers in a squall line and corresponding dynamical and thermodynamical characteristics. *Atmospheric Research*. 2021;(256):105555. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105555.
15. Carey L. D., Petersen W. A., Rutledge S. A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998. *Mon. Wea. Rev.* 2003;(131):1811—1831. doi: 10.1175/2566.1.
16. Simpson J., Keenan T. D., Ferrier B., Simpson R. H., Holland G. J. Cumulus mergers in the maritime continent region. *Meteor. Atmos. Phys.* 1993;(51):73—99. doi: 10.1007/BF01080881.
17. Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S. Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia. *JKAU. Met., Env. & Arid Land Agric. Sci.* 2011;(22):23—39 (2011 A.D./1432 A.H.). doi: 10.4197/Met. 22-2.2.
18. Sin'kevich A., Krauss T. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging. *Atmospheric Research*. 2014;(142):124—132. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.06.007.
19. Sin'kevich A., Krauss T. Cloud impacts in Saudi Arabia, a statistical evaluation of the results. *Meteorologiya i Hidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2010;(6):26—37. (In Russ.).
20. Sin'kevich A. A., Dovgaliuk Iu. A., Veremei N. E., Mikhailovskii Iu. P. *Slitianie konvektivnykh oblakov = Convective clouds merging*. St. Petersburg: Amirite LLC, 2018: 280 p. (In Russ.).
21. Stalker J. R., Knupp K. R. Cell merger potential in multicell thunderstorms of weakly sheared environments: Cell separation distance versus planetary boundary layer depth. *Mon. Wea. Rev.* 2003;(131):1678—1695. doi: 10.1175/2556.1.
22. Dixon M., Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting — A radar-based methodology. *J. Atmos. and Oceanic Technol.* 1993;(10):785—797. doi: 10.1175/1520-0426(1993)010%3c0785:titaa%3e2.0.co;2.
23. Abdullaev S. M., Zhelnin A. A., Lenskaia O. Iu. Structure of mesoscale convective systems in Central Russia. *Meteorologiya i hidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2012;(1):20—32. (In Russ.).
24. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Kotelevich A. F., Sirota N. V. Automated system of radar information processing for storm warning and active impact on cloud processes. *Tr. XXVII Vseross. Simpoziuma «Radiolokatsionnye issledovaniya prirodnich sred» = XXVII All-Russia Symposium "Radar Investigations of Natural Environments"*. St. Petersburg, 2011:211—225. (In Russ.).

25. Старостин А. Н., Лившиц Е. М., Швецов В. С. Mesoscale structure of radio echo fields of convective clouds in Moldova. *Meteorologiya i hidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1983;(10):55—59. (In Russ.).
26. Livshits E. M., Petrov V. I. The splitting of convective storms. Part I. Dynamics and Kinematics. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(65):648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670. (In Russ.).
27. Livshits E.M., Petrov V.I. The splitting of convective storms. Part II. Organizations of the mesoscale structure of the Thunderstorm process. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(66):20—41. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670. (In Russ.).
28. Livshits E. M., Petrov V. I. Radar detection of the location of the feeder cloud line. Part I. Main motion vectors and their relation in powerful hail storms. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferenzii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy = Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes*. Nalchik, 2021: 192—198. (In Russ.).
29. Livshits E. M., Petrov V. I. Radar detection of the location of the feeder cloud line. Part II. Results of the study. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferenzii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy = Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes*. Nalchik, 2021:198—204. (In Russ.).
30. Калов Х. М., Калов Р. Х. *Fizicheskie osnovy, metody i sredstva aktivnykh vozdeystvii na grozogradovye oblaka i tumany = Physical foundations, methods and means of active effects on lightning clouds and fogs*. Nalchik, 2010: 219 p. (In Russ.).
31. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation. *Mon. Weather Rev.* 1981;(109):171—180. doi: 1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
32. Klemp J. B. Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987;(19):369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.

Информация об авторах

Евгений Михайлович Лившиц, свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия, evmaleposoru@gmail.com.

Василий Иванович Петров, свободный исследователь, Кишинев, Республика Молдова.

Information about authors

Evgenii M. Livshits, Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@gmail.com.

Vasilii I. Petrov, Free Researcher, Kishinev, Republic of Moldova.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.07.2022

Принята к публикации после доработки 12.11.2022

The article was received on 10.07.2022

The article was accepted after revision on 12.11.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 644—674.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):644—674.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.535(282.247.29)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674

Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика)

Руслан Владимирович Боскачёв¹, Борис Валентинович Чубаренко²

¹ Калининградский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — филиал ФГБУ «Северо-Западное управление УГМС», г. Калининград, Российская Федерация, combat.130@mail.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе выполнен статистический анализ изменчивости расхода воды в рукавах Нижняя Преголя и Дейма (по данным гидрологического поста (ГП) Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск в 1990—2020 гг.) и уровня воды Калининградского / Вислинского¹ залива (ГП Краснофлотское), рукава Нижняя Преголя (ГП Калининград-РП), реки Преголи (ГП Преголя-Гвардейск), рукава Дейма (ГП Дейма-Полесск) и Куршского залива (ГП Открытое) в период 2002—2017 гг. Выявлен положительный тренд, взаимосвязь колебаний уровня, особенности перераспределения стока р. Преголи по рукавам и изменения режима распределения на рубеже 2000 г.

Ключевые слова: расход и уровень воды, корреляция, временной тренд, статистические характеристики, подпор.

Благодарности. Авторы статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам Калининградского ЦГМС — филиала ФГБУ «Северо-Западное УГМС» за оказанную поддержку, О. В. Горелец и П. В. Терскому (ГОИН) за исключительно полезные замечания и советы, позволившие провести более тщательный анализ материала и улучшить рукопись, а также А. В. Килесо (ИОРАН) за помощь в численном анализе критериев KPSS и Дики—Фуллера. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19–35–90108 (Р. В. Боскачёв) и темы № FMWE–2021–0012 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Б. В. Чубаренко).

Для цитирования: Боскачёв Р. В., Чубаренко Б. В. Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674.

¹ На официальных картах северная часть залива, расположенная в границах Российской Федерации, называется Калининградским заливом, южная (польская) часть — Вислинским. Историческое название — Frisches Haff (нем.). В польских источниках весь залив называется Вислинским (Zalew Wiślany), в англоязычных изданиях употребляется этноним Vistula Lagoon. Согласно [1] в работе будет использовано название Калининградский / Вислинский, хотя оно имеет недочет — читается как «или-или», а не «и».

Original article

Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic)

Ruslan V. Boskachev¹, Boris V. Chubarenko²

¹ Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring — local branch of the Federal State Budgetary Institution “North-Western Department of the ROSHYDROMET”, Kaliningrad, Russian Federation, combat.130@mail.ru

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Summary. Interest in studying the statistical features of the temporal variability of water levels and discharges in the hydrological system the Vistula Lagoon — the Pregolya River — the Curonian Lagoon is closely related to the theoretical possibility of the flow of brackish waters from the Vistula Lagoon up the Downstream Pregolya branch to the town of Gvardeisk and further through the Deyma branch to the Curonian Lagoon. The work includes a statistical analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River: water discharge in the Downstream Pregolya and Deyma branches (according to the Pregolya-Gvardeysk and Deyma-Gvardeysk data in 1990—2020), the water level of the Vistula Lagoon (Krasnoflotskoye), the Downstream Pregolya branch (Kaliningrad-Fishery Port), the Pregolya River (Pregolya-Gvardeysk), the Deyma branch (GP Deima-Polesk) and the Curonian Lagoon (Otkrytoe) in the period 2002—2017. A positive trend for water level was revealed especially for the point of splitting of the Pregolya River into two mouth branches (Downstream Pregolya and Deyma). The relationship of the water level fluctuations showed the influence of lagoons water level oscillations upstream the mouth branches of the Pregolya River. The redistribution of the runoff of the Pregolya River between the two mouth branches depends on the runoff magnitude. The structural change in the runoff redistribution mode was found at the turn of 2000.

Acknowledgements. The authors of the article express their sincere gratitude to the staff of the Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring — local branch of the Federal State Budgetary Institution “North-Western Department of the ROSHYDROMET” for their support, Gorelets O. V. and Terskiy P. V. (GOIN) for extremely useful remarks and advice, which made it possible to deepen the analysis of the material and improve the manuscript, as well as Kileso A. V. (IORAN) for his help in the numerical analysis of the KPSS and Dickey-Fuller criteria. The study was supported by RFBR grant no. 19–35–90108 (Boskachev R. V.) and the topic No. FMWE–2021–0012 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (Chubarenko B. V.).

For citation: Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674. (In Russ.).

1. Введение

Калининградский/Вислинский [1] и Куршский заливы находятся в юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). По аналогии с речной¹ [2] и озерно-речной² [3]

¹ Речная система — совокупность рек, сливающихся вместе и выносящих свои воды в виде общего потока [1].

² Озерно-речная система — природные водные образования, состоящие из соединенных между собой рек и озер [3].

системами эти заливы также рассматриваются как связанная гидрологическая система¹ [4—6].

Связующим звеном для компонентов этой гидрологической системы являются устьевые рукава р. Преголи (рис. 1) — Нижней Преголя² и Деймы [7—8]. Рукав Нижняя Преголя впадает в принимающий водоем — Калининградский залив, а рукав Дейма — в Куршский [9]. То есть в объекте исследования «Калининградский залив — рукав Нижняя Преголя — рукав Дейма — Куршский залив» присутствуют 2 водотока и 2 приемных водоема.

Рукав Нижняя Преголя является более полноводным, доли расходов воды рукавов Нижняя Преголя и Дейма от общего расхода р. Преголи составляют примерно 40—60 % (1901—1956 гг.) [9] и 34—66 % (1936—1942 и 1960—1965 гг.) [10] соответственно. Авторский анализ распределения расходов между рукавами р. Преголи за период 1990—2020 гг. показал соотношение 54—46 % [7]. Поскольку устойчивой тенденции в изменении долей расходов в течение времени не обнаруживается, можно констатировать, что эти доли находятся в пределах 54—66 % и 34—46 % соответственно [7, 9, 11].

Рост уровня моря характерен как для открытого побережья юго-восточной Балтики (скорость роста 1,3—1,5 см/10 лет в XX в.) [12—14], так и для Куршского и Калининградского / Вислинского заливов (увеличение скорости роста уровня до 3,7—4,5 см/10 лет отмечено к концу XX — началу XXI в. [15—18], а для устья р. Преголи в период 1996—2015 гг. даже 6,4 см/10 лет [12]). Это дает основание предполагать, что в рядах уровня воды в изучаемой системе присутствует линейный тренд.

Ранее (за исключением [7]) не проводилось обсуждения гидрологических характеристик рукавов Нижней Преголи и Деймы на согласованных наборах данных (временной изменчивости и корреляции между собой рядов уровня воды, а также перераспределения стока р. Преголи по рукавам). Целью настоящей работы является статистический анализ изменчивости уровней воды на гидрологических постах системы «Калининградский залив — река Преголя — Куршский залив» за 16-летний период 2002—2017 гг. и ежедневных расходов р. Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы за 31-летний (типичный для климатических оценок) период 1990—2020 гг.

Результаты этого анализа имеют не только самостоятельное значение, но также помогут в будущем уточнить характер гидрологической связи [6] между Калининградским и Куршским заливами. Также обсуждаемые вопросы тесно связаны с проблемой проникновения солоноватых вод Калининградского залива в р. Преголю [19] вплоть до места расположения водозаборов городской системы водоснабжения. В 1990-х гг. эта проблема решилась введением резервного водохранилища. Но процесс нагона заливных вод никуда не исчез. Текущие изменения

¹ Система — множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство [5].

² Согласно [9] Нижней Преголей называется участок нижнего течения р. Преголи от точки впадения р. Лавы до устья р. Преголи в Калининградском заливе. В работе это название применяется только к 90 % части этого водотока, т. е. от ответвления рукава Деймы до устья р. Преголи.

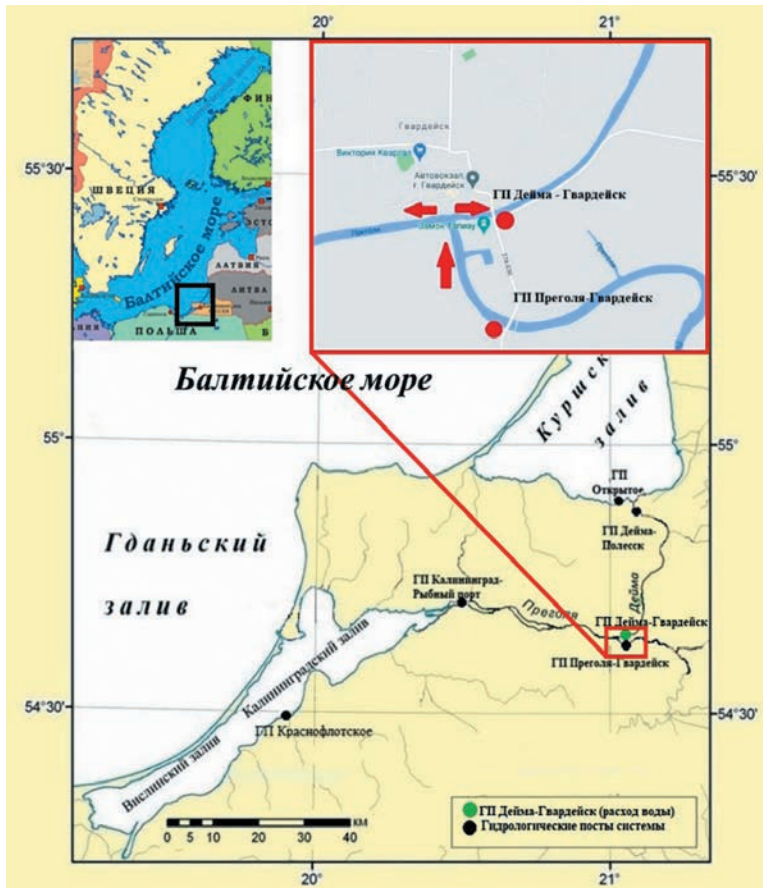


Рис. 1. Расположение гидрологических постов в Калининградском и Куршском заливах, на реке Преголе и ее рукавах Нижней Преголи и Деймы.

Fig. 1. Location of hydrological posts in the Kaliningrad and Curonian Lagoons, on the Pregolya River and its branches of the Downstream Pregolya and Deyma.

локального климата [20], проявляющиеся в подъеме уровня в Балтийском море, и, соответственно, в Калининградском заливе, и на устьевом участке р. Преголи, способствуют учащению случаев, когда язык солоноватых вод будет проникать все глубже вверх по руслу реки, достигать водохранилища и блокировать его на длительное время, большее, чем планируемый срок его расходования.

2. Материалы и методы

В работе использованы данные Роскомгидромета на морских гидрологических постах (далее — МГП) Краснофлотское (Калининградский залив) и Открытое (Куршский залив) и речных гидрологических постах (далее — РГП)

Калининград-Рыбный порт (рукав Нижняя Преголя, далее для краткости Калининград-РП), пара Преголя-Гвардейск (основное русло р. Преголи) и Дейма-Гвардейск, а также Дейма-Полесск (оба — рукав Дейма) (табл. 1, рис. 1). В работе проанализированы данные по уровню воды на всех этих постах за период 2002—2017 гг. (16 лет). Данные по расходу воды на РГП Преголя-Гвардейск (р. Преголя), Дейма-Гвардейск (рукав Дейма) проанализированы для периода 1990—2020 гг. (31 год).

МГП Краснофлотское расположен в пос. Краснофлотское на берегу центральной части Калининградского / Вислинского залива, МГП Калининград-РП — в черте г. Калининграда, на территории Рыбного порта, РГП Преголя-Гвардейск расположен в юго-западной части г. Гвардейск примерно в 500 м выше разделения р. Преголи на два рукава (Нижняя Преголя и Дейма), РГП Дейма-Гвардейск — на восточной окраине г. Гвардейск у шоссе моста, РГП Дейма-Полесск в черте — г. Полесск выше моста Орлиный, МГП Открытое — в поселке Заливино на берегу Куршского залива. В исследуемый период указанные гидрологические посты не переносились.

Уровень воды на всех речных постах фиксируется наблюдателями Росгидромета в 06:00 и 18:00 по Гринвичу¹. За эти же сроки брались данные с морских постов. В настоящий момент только на РГП Калининград-РП (после большого перерыва 2008—02.2016 гг.) была установлена автоматическая станция (АМС) с удаленной передачей.

Таблица 1

Характеристики гидрологических постов системы
«Калининградский залив — рукав Нижняя Преголя — рукав Дейма — Куршский залив»
Characteristics of hydrological stations of the system «Vistula Lagoon —
branch Downstream Pregolya — branch Deyma — Curonian Lagoon»

ГП Красно-флотское	ГП Калинин-град-РП	ГП Преголя-Гвардейск	ГП Дейма-По-лесск	ГП Открытое
Морской ГП	Морской ГП	Речной ГП	Речной ГП	Морской ГП
	Расстояние вдоль русла р. Преголи — 50,5 км	Расстояние вдоль русла р. Дейма — 32 км	Расстояние вдоль русла р. Дейма между ГП — 6 км	
Расстояние по Калининград-скому заливу — 53 км				
Уровень воды: 06:00 и 18:00 (GMT), январь 2002 г. — декабрь 2017 г., дискретность 12 ч, до 11 600 наблюдений на каждом посту.				
Рейка ГМ-3	АМС	Рейка ГМ-3		
Расход воды: 06:00 GMT, 1990—2020 гг. (11324 наблюдений на каждом посту):		Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск		

Ввиду отсутствия наблюдений за уровнем воды на ГП Калининград-РП в период с января 2008 г. по февраль 2016 г. основные статистические характеристики

¹ В настоящий момент это 08:00 и 20:00 местного времени (по Калининграду). В те годы, когда в России были введены летнее и зимнее время, сроки наблюдений по местному времени менялись соответственно.

изменения уровня воды на всех постах были оценены для трех временных промежутков: полный период 2002—2017 гг. (табл. 2), период 2008—02.2016 гг., когда отсутствовали наблюдения на ГП Калининград-РП (табл. 3) и объединенные данные периодов 2002—2007 гг. и 03.2016—2017 гг., т. е. в тот период, для которых есть данные всех постов (табл. 4).

Анализ изменчивости уровня воды проводился не для абсолютных значений, а их аномалий (отклонений от среднего). Это позволяет избежать сравнения уровней между собой в абсолютных величинах, что в настоящий момент невозможно, т. к. не ясна методическая основа этого сравнения, поскольку не для всех постов Калининградской области известны абсолютные значения высоты их нулевых отметок в единой Балтийской системе высот.

Ряды уровня анализировались на наличие трендовой составляющей. Временные ряды уровня $H(t)$ раскладывались на составляющие: среднее за период (H_{avr}), член линейного тренда по времени для аномалии $A_H(k_H$ — коэффициент линейного тренда для аномалии A_H) и остаточная составляющая $H_r(t)$, которая включала в себя всю изменчивость, вызванную сезонными, синоптическими и суточными вариациями:

$$\begin{aligned} H(t) &= H_{avr} + k_H t + H_r(t), \\ A_H(t) &= H(t) - H_{avr} = k_H t + H_r(t), \end{aligned} \quad (1)$$

Оценка значимости трендов выполнялась по критерию Стьюдента [21]:

$$t = \frac{|r| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (2)$$

где r — коэффициент корреляции между аномалиями уровня и линейным трендом; $(n-2)$ — число степеней свободы (n — количество измерений уровня воды на ГП). Тренд считался значимым, если оценка критерия Стьюдента превышала критическое значение при заданном уровне значимости ($t > T_{кр}$). В нашем случае число измерений было более 5000 (табл. 5), а для чисел свобод от 1000 до бесконечности критическое значение равно 3,3 [21, 22] с вероятностью надежности 99,9 %.

Поскольку линейные тренды дают значительный вклад в повышение корреляции между временными рядами, статистические связи между рядами уровня воды на разных постах анализировались с помощью корреляционного анализа между аномалиями без учета тренда, т. е. между составляющими $H_r(t)$ соответствующих временных рядов.

Согласно предписаниям Роскомгидромета, расходы воды на РГП Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск определяются по данным измерения уровня воды на 06:00 по Гринвичу с помощью кривых расхода, имеющих для профилей расчетных створов. Контрольная оценка расхода по данным прямых измерений скорости потока проводится на расчетных створах механическими вертушками [23] ежедекадно, в периоды высоких или очень низких уровней воды. По этим оценкам находятся учитывающие подпорные явления коэффициенты, с помощью которых проводится корректировка расходов.

Поскольку регулярные данные по расходам имеются только на РГП Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск (рис. 1, врезка), расход воды рукава Нижней Преголи в настоящей работе определяется из условия сохранения потока при разветвлении р. Преголи на два рукава:

$$Q_{\Pi} = Q_{\text{ни}} + Q_{\text{д}}, \quad (3)$$

где Q_{Π} — приходящий расход р. Преголи ($\text{м}^3/\text{сек}$); $Q_{\text{ни}}$ — расход рукава Нижней Преголи ($\text{м}^3/\text{сек}$); $Q_{\text{д}}$ — расход рукава Деймы ($\text{м}^3/\text{сек}$).

Ряды расходов воды анализировались на наличие трендовой составляющей по схеме (1) с той лишь разницей, что ряд не включал выделение среднего значения.

Оценки рядов по уровню и расходу воды на однородность проводились [22] по десяти критериям Диксона: пять для максимальных (4) и пять для минимальных (5) значений ранжированного по возрастанию ряда (Y_i , $i = 1 \div n$), имеющего n значений. Критические значения, по которым делался вывод о принятии гипотезы однородности (величина критерия должна быть не больше критического значения), при уровне значимости 0,05 составляют для $D1$ — $D5$: 0,26; 0,15; 0,18; 0,16; 0,22 [22]:

$$\begin{aligned} D1^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-1}}{Y_n - Y^1}, \\ D2^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-1}}{Y_n - Y^2}, \\ D3^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-2}}{Y_n - Y^2}, \\ D4^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-2}}{Y_n - Y^3}, \\ D5^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-2}}{Y_n - Y^1}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D1^1 &= \frac{Y^1 - Y^2}{Y^1 - Y_n}, \\ D2^1 &= \frac{Y^1 - Y^2}{Y^1 - Y_n^{-1}}, \\ D3^1 &= \frac{Y^1 - Y^3}{Y^1 - Y_n^{-1}}, \\ D4^1 &= \frac{Y^1 - Y^3}{Y^1 - Y_n^{-2}}, \\ D5^1 &= \frac{Y^1 - Y^3}{Y^1 - Y_n}. \end{aligned} \quad (5)$$

Кроме того, оценки на однородность были выполнены по критерию Смирнова—Граббса [24] для максимального (Y_n) и минимального (Y_1) членов ранжированного по возрастанию ряда ($Y_i, i = 1 \div n$), имеющего стандартное отклонение σ :

$$G_n = \frac{Y_n - Y_{cp}}{\sigma}, \quad (6)$$

$$G_1 = \frac{Y_{cp} - Y_1}{\sigma}. \quad (7)$$

Для анализа возможности приведения рядов к однородным за счет исключения экстремальных значений критерий Смирнова—Граббса был применен последовательно для все более и более укороченных (с одной и другой стороны) рядов, отсортированных по возрастанию, т. е. последовательно отбрасывались самое малое и самое большое значения (при этом ряд оставлялся прежним со стороны больших и, соответственно, меньших значений).

Для проверки — не изменяются ли со временем статистические свойства анализируемых временных рядов — была осуществлена оценка их стационарности [24] как визуально, так и с помощью статистических критериев. Причем, поскольку временной тренд, как одна из основных характеристик нестационарности, уже выделялся в анализируемых рядах в явном виде (см. (1)), анализ стационарности проводился для рядов после исключения тренда, т. е. остаточных составляющих $H_r(t)$ в (1).

Использовались два дополняющих друг друга статистических критерия: критерий KPSS (критерий Квятковского—Филлипса—Шмидта—Шина (Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y.) — KPSS test, [25]) и расширенный тест Дики—Фуллера (ADF-test, [26, 27]). Критерий KPSS предполагает выдвижение двух конкурирующих гипотез (H_0 — временной ряд является стационарным; H_1 — временной ряд не является стационарным). В расширенном тесте Дики—Фуллера конкурирующие гипотезы выдвигаются в обратном порядке (H_0 — временной ряд содержит единичный корень, т. е. он нестационарный; H_1 — временной ряд не содержит единичный корень, т. е. он стационарный). В качестве расчетного инструмента использовался статистический модуль для задач эконометрики и статистического моделирования на языке программирования Python — “statsmodels” [28].

Также оценка стационарности рядов для остаточных составляющих $H_r(t)$ проводилась на основе сравнения выборочных средних и дисперсий, для этого применялись критерии Стьюдента и Фишера. Ряды данных уровня воды были разделены на две фактически равные части. Первый период (первая выборка) объединял данные для 2002—2007 гг. и марта 2016 — конца 2017 гг. ($m = 5724$ значений). В качестве второго периода (вторая выборка) был взят период с начала 2008 г. по февраль 2016 г. ($n = 5903$ значений), когда отсутствовали данные на ГП Калининград-РП. Методика оценки стационарности на основе критериев Стьюдента и Фишера приводится в [21]. Если эмпирические значения статистик Стьюдента и Фишера больше их критических (пороговых) значений, то выборка считается нестационарной по выборочной средней и выборочной дисперсии. В противоположном случае у нас есть основания полагать, что выборка является стационарной.

3. Результаты

3.1. Временная изменчивость и статистические характеристики колебания уровня воды за 2002—2017 гг.

Прежде всего, по данным прямых измерений по уровню за 2002—2017 гг. выполнен анализ изменчивости характеристик уровня для каждого поста. Временная изменчивость аномалий уровня воды (с трендом и без тренда) на гидрологических постах Краснофлотское, Калининград-РП, Преголя-Гвардейск, Дейма-Полесск и Открытое за период 2002—2017 гг. (16 лет) показана на рисунках 2—6. Временной тренд визуально выделяется фактически для всех постов.

То, что в МГП Калининград-РП наблюдения прерывались, вынуждает рассматривать ряды, разделяя их на отдельные интервалы. Статистические характеристики для полного анализируемого периода 2002—2017 гг. представлены в табл. 2; для двух интервалов: 2008—02.2016 гг. (период отсутствия наблюдений на МГП Калининград-РП) — в табл. 3, а для искусственно объединенного интервала 2002—2007 гг. и 03.2016—2017 гг. — в табл. 4. Представлена информация о пропусках в данных, количестве членов ряда (N , дискретность 12 часов), значениях средних ($\overline{Avr}$), медианы (Me), минимального (Min) и максимального (Max)

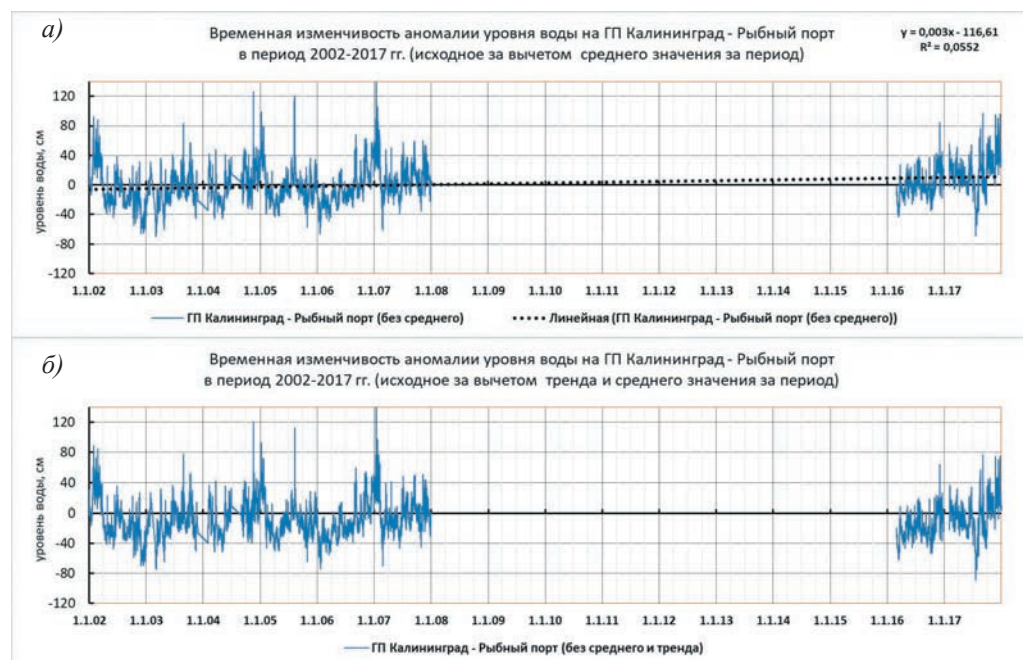


Рис. 2. Временная изменчивость уровня воды на ГП Калининград-РП:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 2. The water level variations at the HS Kaliningrad-FP:

а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

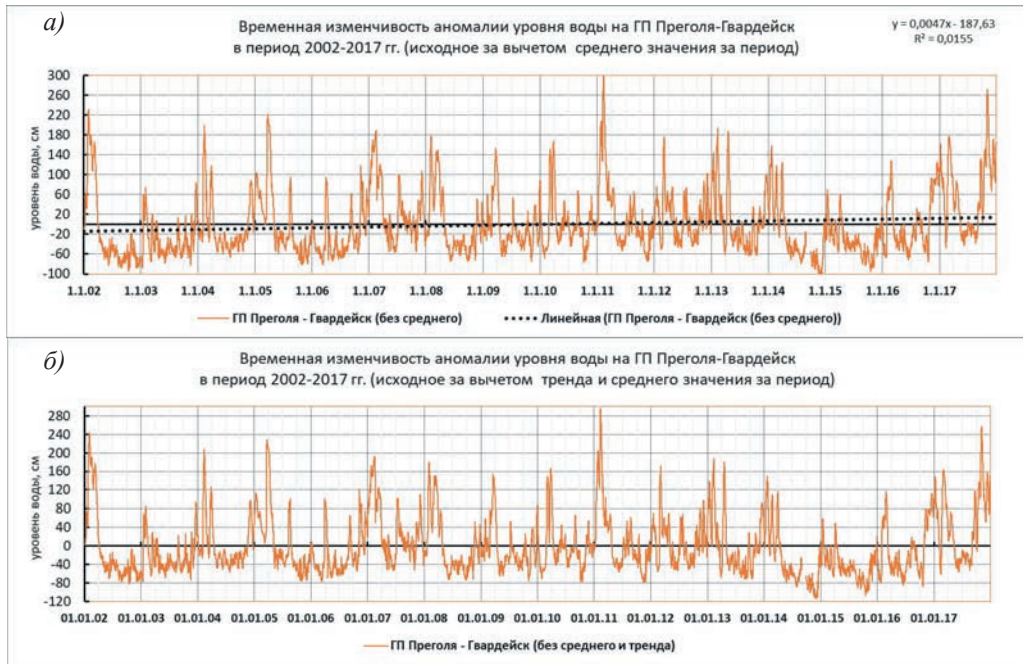


Рис. 3. Временная изменчивость уровня воды на ГП Преголя-Гвардейск:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 3. The water level variations at the HS Pregolya-Gvardeysk:

а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

уровня, среднеквадратического отклонения (σ), размаха (S), квартилей 25, 50 и 75 % (q_{25} , q_{50} , q_{75}), межквартильного расстояния ($q_{75} - q_{25}$), коэффициента асимметрии (As), тренда в мм в год (Tr) и полного изменения по тренду ΔH в см за период.

Таблица 2

Статистические характеристики изменчивости аномалий уровня воды (без тренда) на постах МГП Краснофлотское, МГП Калининград-РП, РГП Преголя-Гвардейск, РГП Дейма-Полесск, МГП Открытое за период 2002—2017 гг.

Statistical characteristics of variability of the water level anomaly (without trend) at the stations of MHS Krasnoflotskoe, MHS Kaliningrad-FP, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the period 2002—2017.

Гидрологический пост	МГП Калининград-РП	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
Пропуски в данных	01.2008—02.2016	нет	нет	01.2002, 11.2003, 11.2005, 12.2007, 01–10.2008	01.2002, 02.2003, 02.2004, 10.2004, 02–04.2010
N	5662	11668	11668	10952	11248
Avr ; Me (см)	–10; –12	–1; –20	0; –3	1; –1	1; 0

Гидрологический пост	МГП Калининград-РП	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
$Min; Max$ (см)	-88; 141	-114; 296	-60; 106	-79; 115	-59; 106
$\sigma; S$ (см)	24; 229	63; 410	24; 166	20; 194	22; 165
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (см)	-26; -12; 4	-45; -20; 26	-16; -3; 12	-12; -1; 13	-13; 0; 13
$q_{75} - q_{25}$ (см)	30	71	26	25	26
As (б/р)	0,7	1,3	0,8	0,4	0,7
Tr (мм/год)	10,95	17,16	6,57	5,48	2,92
ΔH (см)	17,5	27,5	10,5	8,8	4,7

Если для всех постов средние значения вариаций аномалий без тренда близки к нулю (независимо от периода), то для МГП Калининград-РП эта величина порядка 5 % от размаха, что обусловлено погрешностью при построении линии тренда из-за наличия пропуска в данных. Величины размаха и среднего квадратичного отклонения для всех постов сравнимы между собой на разных временных интервалах.

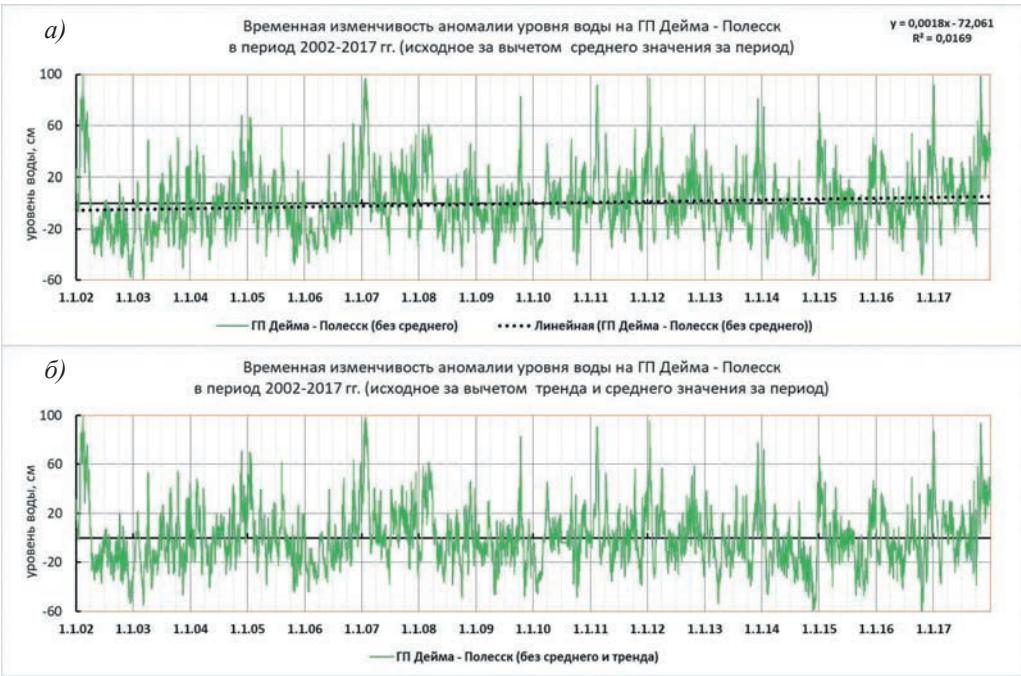


Рис. 4. Временная изменчивость уровня воды на ГП Дейма-Полесск:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 4. The water level variations at the HS Deyma-Polessk:

а) anomaly with indication of trend line.; б) residual component $H_r(t)$.

Таблица 3

Статистические характеристики изменчивости аномалий уровня воды (без тренда) на постах МГП Краснофлотское, РГП Преголя-Гвардейск, РГП Дейма-Полесск, МГП Открытое за период 2008—02.2016 гг. (в период отсутствия наблюдений на МГП Калининград-РП).

Statistical characteristics of variability of the water level anomaly (without trend) at the stations of MHS Krasnoflotskoe, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the period 2008—02.2016 (during the absence of observations at the MHS Kaliningrad-FP).

Параметр	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
Пропуски	нет	нет	01—10.2008	02—04.2010
N	5964	5964	5352	5763
$Avr; Me$ (см)	−6; −21	−2; −4	−1; −2	−1; −1
$Min; Max$ (см)	−114; 296	−60; 95	−79; 115	−57; 106
$\sigma; S$ (см)	59; 410	21; 155	21; 194	20; 163
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (см)	−46; −21; 19	−16; −4; 10	−13; −2; 11	−13; −1; 10
As (б/р)	1,3	0,6	0,3	0,4

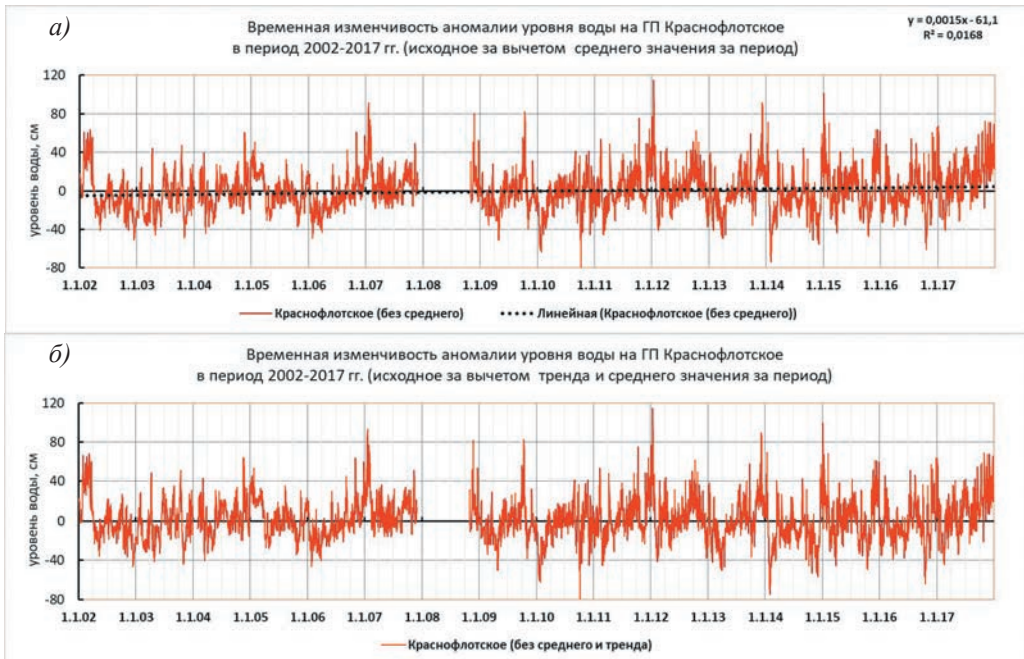


Рис. 5. Временная изменчивость уровня воды на ГП Краснофлотское:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 5. The water level variations at the HS Krasnoflotskoe:

а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

Таблица 4

Статистические характеристики изменчивости аномалий уровня воды (без тренда) на постах МГП Краснофлотское, МГП Калининград – РП, РГП Преголя-Гвардейск, РГП Дейма-Полесск, МГП Открытое за периоды 2002—2007 гг. и 03.2016—2017 гг. (период, когда проводились наблюдения на МГП Калининград-РП).

Statistical characteristics of variability of the water level anomaly (without trend) at the stations of MHS Krasnoflotskoe, MHS Kaliningrad-FP, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the periods 2002—2007 and 03.2016—2017 (period of observation at the MHS Kaliningrad-FP).

Параметр	МГП Калининград-РП	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
Пропуски	01.2017	нет	нет	01.2002, 11.2003, 11.2005, 12.2007	01.2002, 02.2003, 02.2004, 07.2017
N	5662	5724	5724	5722	5486
$Avr; Me$ (см)	–10; –12	4; –19	2; –2	2; 0	3; 0
$Min; Max$ (см)	–88; 141	–89; 257	–60; 106	–64; 93	–59; 104
$\sigma; S$ (см)	24; 229	66; 345	25; 166	20; 157	23; 163
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (см)	–26; –12; 4	–45; –20; 26	–16; –3; 12	–12; –1; 13	–13; 0; 12
As (б/п)	0,7	1,3	0,9	0,5	0,8

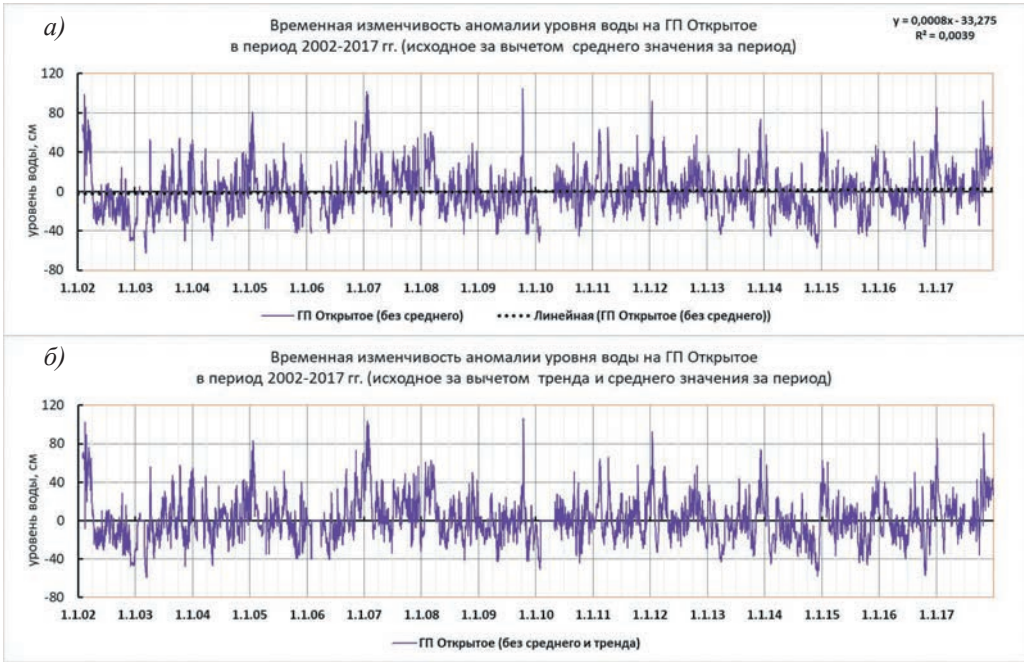


Рис. 6. Временная изменчивость уровня воды на ГП Открытое:
а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 6. The water level variations at the HS Otkrytoe:
а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

3.2. Корреляции временного хода уровня воды на разных постах

Для всех пар постов гидрологической системы был рассчитан коэффициент корреляции [29] (и его качественный аналог по шкале Шедока, табл. 5) между временными рядами аномалий уровня воды (без тренда) для полного периода (2002—2017 гг., правая верхняя половина табл. 5) и периода, когда были данные всех потов (2002—2007 гг., левая нижняя половина табл. 5).

Связь между колебаниями аномалий уровня воды (без тренда) на всех постах существует и положительна. Коэффициенты корреляции лежат в пределах 0,36—0,95 для периода 2002—2017 гг. и 0,46—0,93 для 2002—2007 гг., что соответствует связи по шкале Шедока от весьма умеренной до высокой. Корреляции за оба периода оказались сопоставимыми. Практически всегда корреляционная связь между изменчивостью уровня воды на гидропостах оказалась выше за период 2002—2017 гг., чем за 2002—2007 гг.

Таблица 5

Попарные корреляции временного хода аномалий уровня воды (без тренда) на гидрологических постах в период 2002—2017 гг. (правая верхняя половина таблицы) и 2002—2007 гг. (левая нижняя половина таблицы).

Pairwise correlations of the time variations of the water level anomaly at hydrological stations for the period 2002—2017 (upper right half of the table) and 2002—2007 (lower left half of the table).

	Краснофлот-ское	Калинин-град-РП	Преголя-Гвардейск	Дейма-Полесск	Открытое
Краснофлотское	1	0,62	0,36	0,79	0,79
Калининград-РП	0,74	1	0,42	0,65	0,62
Преголя-Гвардейск	0,54	0,46	1	0,69	0,61
Дейма-Полесск	0,8	0,76	0,76	1	0,95
Открытое	0,78	0,71	0,67	0,93	1

Примечание. Выделены уровни корреляции по шкале Шедока: полужирный — весьма высокая, полужирный курсив — высокая, серая заливка — заметная, курсив — умеренная.

3.3. Временная изменчивость и статистический анализ расхода воды реки Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы по данным гидрологических наблюдений за период 1990—2020 гг.

Выполнен расчет стандартных статистических характеристик расхода воды (табл. 6), характеризующих гидрологический режим р. Преголи и рукавов Нижней Преголи и Деймы. В табл. 6 представлена информация о тех же переменных, что и в таблицах 2—4. В течение периода 1990—2020 гг. расход воды р. Преголи и ее рукавов (Нижняя Преголя и Дейма) изменялся более чем в 100 раз в пределах: 7—830 м³/с, (–12)—675 м³/с и 1—185 м³/с соответственно. Высокая временная изменчивость расхода воды непосредственно связана с сезонным паводками и половодьями, которые хорошо просматриваются на графике приходящего расхода р. Преголи в виде пиковых для каждого года значений (рис. 7).

Арифметические средние величины всех измеренных значений расхода воды р. Преголи и рукава Деймы за весь исследуемый период составили 81 и 35 м³/с соответственно. Рассчитанное среднее значение за весь исследуемый период для рукава Нижней Преголи составило 47 м³/с. Стоит обратить внимание, что коэффициент асимметрии (As), который отражает расход воды рукава Нижней Преголи, является максимальным (4,5) — он в 1,5 раза превышает этот параметр для расхода р. Преголи (3,0) и в 3 раза превышает коэффициент асимметрии рукава Деймы.

В соответствии с (3) расходы рукавов Нижней Преголи и Деймы в сумме составляют 100 % от приходящего расхода р. Преголи (рис. 8). Среднее значение расхода воды рукава Нижней Преголи за исследуемый период в процентах составило 54,2 %, а рукава Деймы — 45,8 % от общего водотока р. Преголи. Отрицательные значения доли расхода рукава Нижней Преголи соответствуют межукавным перетокам вод (из Нижней Преголи в Дейму) в связи с нагонными явлениями и критически малым расходом р. Преголи.



Рис. 7. Временной ход расхода воды реки Преголи (по данным РГП Преголя-Гвардейск за период 1990—2020 гг., исходные данные без вычитания трендовой составляющей).

Fig. 7. Water flow of the Pregolya River (according to the data of the RHS Pregolya-Gvardeysk for the period 1990—2020, the initial data without subtracting the trend component).

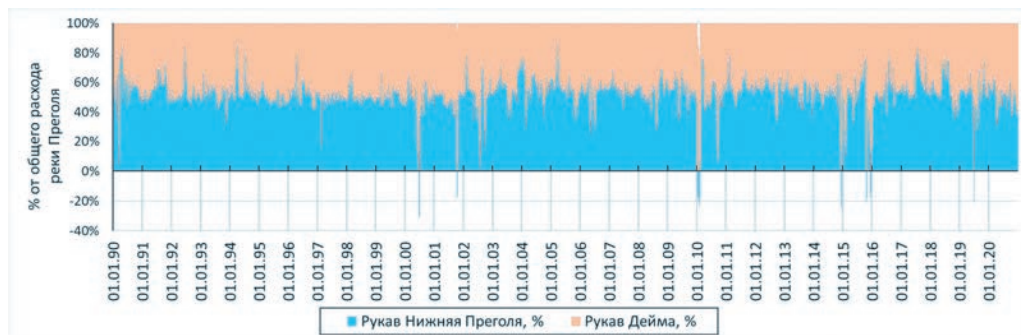


Рис. 8. Временной ход процентного соотношения расходов воды в рукавах реки Преголи (Нижняя Преголя и Дейма) за период 1990—2020 гг.

Fig. 8. Percentage ratio of water flow in the branches of the Pregolya River (Downstream Pregolya and Deyma) for the period 1990—2020.

Таблица 6

Статистические характеристики для расходов воды реки Преголи (до разделения на рукава в г. Гвардейск) и ее рукавов — Деймы (г. Гвардейск) и Нижней Преголи (после разделения реки Преголи на два рукава) за период 1990—2020 гг.

Statistical characteristics for the water flow of the Pregolya River (before the separation into branch in the Gvardeysk) and its branches — Deymy (Gvardeysk) and Downstream Pregoli (after the separation of the Pregolya River into two branches) for the period 1990—2020.

Параметр	Измеренные		Расчетные
	Река Преголя (до разделения на рукава)	Рукав Дейма	Рукав Нижняя Преголя
Дискретность, число значений (N)	1 раз в сутки, 11323		
Доля стока (%)	100	45,8	54,2
Avr ; Me (m^3/c)	81; 52	35; 24	47; 28
Min ; Max (m^3/c)	7,3; 841	1,3; 185	–11,6; 665
Min ; Max (%)	100; 100	7,6; 187,2	–87,2; 92,4
σ ; S (m^3/c)	83; 833	29; 184	58; 677
Мода Mo (m^3/c)	104	17	17
q_{25} ; q_{50} ; q_{75} (m^3/c)	30; 52; 101	14; 24; 46	16; 28; 55
$q_{75} - q_{25}$ (m^3/c)	71	32	39
As (б/р)	3,0	1,5	4,5
Тренд ($m^3/c/год$)	–0,55	–0,18	–0,29
ΔQ (m^3/c)	–17	–5,7	–9,1

3.4. Оценка значимости временных трендов уровня и расхода воды

Для всех постов данные показывают наличие положительного тренда уровня воды и наличие отрицательного тренда для приходящего расхода воды р. Преголи и расхода воды в рукаве Дейме (табл. 7). Значения критерия Стьюдента (t) для всех рядов данных больше $T_{кр} = 3,3$, и следовательно, полученные величины тренда статистически значимы на уровне значимости $\alpha < 0,01$.

Таблица 7

Характеристики тренда для роста аномалии уровня на гидрологических постах за период 2002—2017 гг. и падения расхода воды реки Преголи и рукавов Нижней Преголи и Деймы в период 1990—2020 гг.

Trend characteristics for anomaly level growth at hydrological stations for the period 2002—2017 and flow decrease in the Pregolya River and its branches for the period 1990—2020

Гидрологический пост	Тренд (мм/год)	Прирост аномалии уровня по тренду (см)	$V = n - 2$	r	t
Калининград-РП	11	17,5	5660	0,24	18,2
Преголя-Гвардейск	17,3	27,7	11666	0,12	13,6
Дейма-Полесск	6,6	10,6	11666	0,13	14,2
Краснофлотское	5,5	8,8	10950	0,13	13,7
Открытое	2,9	4,7	11246	0,06	6,6

Водоток	Тренд (м ³ /с/год)	Прирост расхода воды по тренду (м ³ /с)	$V = n - 2$	r	t
Река Преголя	-0,55	-17	11323	0,05	5,7
Рукав Нижняя Преголя	-0,29	-9,1	11323	0,06	6,2
Рукав Дейма	-0,18	-5,7	11323	0,04	4,5

Примечания. V — число степеней свободы; n — количество измерений; r — коэффициент корреляции между аномалией и ее линейным трендом; t — критерий Стьюдента.

3.5. Оценка однородности рядов для уровня и расхода воды

Результаты оценки однородности рядов уровня и расходов представлены в табл. 8 в виде выводов для групп критерия Диксона как для максимальных, так и минимальных значений. Знаком «+» обозначена ситуация о принятии гипотезы однородности, а знаком «-» — отклонение этой гипотезы.

Оценки показывают, что со стороны минимальных значений ряды уровня воды вполне однородны, а вот со стороны максимальных значений критерий Диксона превышает критические значения (значительная неоднородность выявлена для ГП Калининград-РП) на всех гидрологических постах, кроме ГП Открытое. Расходы воды, напротив, оказались однородными по данному критерию.

Критерий Смирнова—Граббса указал на неоднородность рядов аномалий уровня воды как со стороны максимальных, так и минимальных значений (см. первую и последнюю точки в диаграмме на рисунках 9 и 10, значения в которых превышают критический уровень, равный 2,9).

Можно ли путем исключения экстремальных (минимальных и максимальных) значений добиться однородности рядов данных? Результат последовательного применения критерия Смирнова—Граббса для более укороченных (с одной и другой стороны) рядов уровня и расходов воды представлен на диаграммах (рисунки 9 и 10), где каждая точка соответствует значению критерия Смирнова—Граббса для текущего максимального (правый набор точек) или минимального (левый набор точек) значения анализируемого ряда. Эти наборы хорошо визуальны разделяются скачком именно в окрестности среднего значения для анализируемого ряда.

Диаграммы (рисунки 9 и 10) иллюстрируют более категоричный (по сравнению с критерием Диксона) результат — ряды уровня не являются однородными ни со стороны минимальных, ни со стороны максимальных значений. Слишком много членов ряда нужно отбросить, чтобы оставшиеся ряды образовали однородную последовательность, для которой критерий Смирнова—Граббса окажется меньше своей критической величины, равной 2,9 (рисунки 9 и 10). Ряды измеряемых расходов воды для р. Преголи и рукава Деймы, напротив, являются однородными со стороны минимальных и неоднородными со стороны максимальных значений.

Таким образом, оценки по критериям Диксона и Смирнова—Граббса показали, что анализируемые ряды уровня и расходов воды (без линейного тренда) не являются полностью однородными. Ряды содержат данные без случайных выбросов,

все данные иллюстрируют реальные процессы, но только с той важной оговоркой, что этих процессов, действующих одновременно и дающих значительные вариации значений, несколько. Исключение нескольких (даже десятков) экстремальных значений не имеет смысла, т. к. это не превращает ряды в однородные.

Таблица 8

Результаты оценки критерия Диксона и выводы, полученные после его сравнения с критическими значениями для D1-D5 (0,26; 0,15; 0,18; 0,16; 0,22 [25]), для рядов уровня и расходов воды на ГП Калининград-РП, Преголя-Гвардейск (и Дейма-Гвардейск), Дейма-Полесск, Открытое, Краснофлотское в период 2002—2017 гг.

Estimations of the Dickson criterion and conclusions after the comparison with the thresholds for the D1-D5 (0,26; 0,15; 0,18; 0,16; 0,22 [25]) for the water level and discharge in MHS Krasnoflotskoe, MHS Kaliningrad-FP, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the period 2002—2017

ГП (уровень) / Водоток (расход)	Величины критерия Диксона и выводы для:			
	максимумов		минимумов	
Калининград-РП	0,28—0,35	-----	0,04—0,06	+++++
Преголя-Гвардейск	0,12—0,22	++---	0,002—0,005	+++++
Дейма-Полесск	0,05—0,27	++---	0,004—0,012	+++++
Открытое	0,01—0,01	+++++	0,004—0,007	+++++
Краснофлотское	0,13—0,29	++---	0,015—0,022	+++++
Река Преголя	0,011—0,012	+++++	0,0002—0,002	+++++
Рукав Дейма	0,005—0,027	+++++	0,0005—0,001	+++++
Рукав Нижняя Преголя	0,01—0,02	+++++	0,001—0,003	+++++

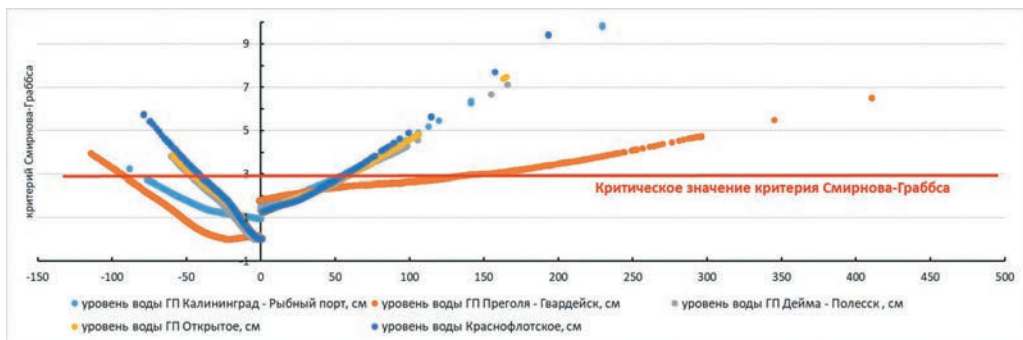


Рис. 9. Величины критерия Смирнова—Грabbса для аномалий уровня воды на гидрологических постах системы Калининградский залив — река Преголя — Куршский залив в период 2002—2017 гг. при последовательном исключении самых больших и самых маленьких величин ряда.

Fig. 8. The values of the Smirnov-Grubbs criterion for water level anomalies at the hydrological stations of the Kaliningrad Lagoon — Pregolya River — Curonian Lagoon system in the period 2002—2017 with the sequential rejection of the largest and smallest values of the series.

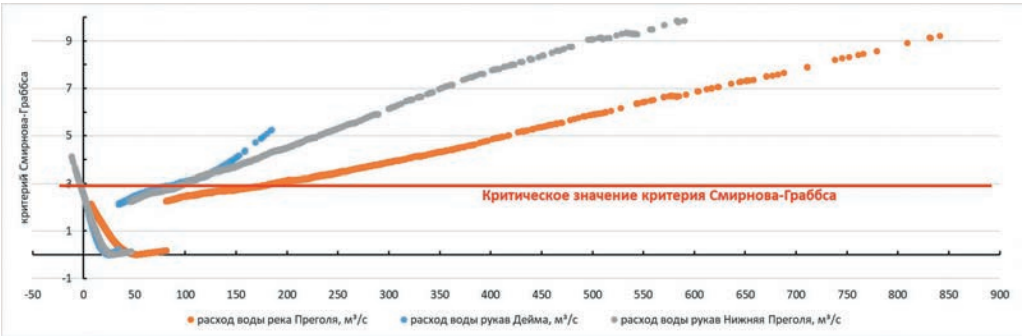


Рис. 10. Величины критерия Смирнова—Грэмса для приходящего расхода воды реки Преголя и расходов рукавов Дейма и Нижняя Преголя в период 1990—2020 гг. при последовательном исключении самых больших и самых маленьких величин ряда.

Fig. 10. The values of the Smirnov-Grubbs criterion for the incoming flow of water of the Pregolya River and the flow of water of the Deyma and Downstream Pregolya branches in the period 1990—2020 when the largest and smallest values of the series are consistently discarded.

3.6. Оценка стационарности рядов уровня и расхода воды

Нестационарность рядов уровня и расхода воды в связи с наличием линейного тренда нами уже была выделена в разделе 3.4. Остается вопрос — стационарны ли аномалии для уровня и расходов воды, т. е. все ли факторы, обеспечивающие нестационарность, убраны за счет исключения линейного тренда?

Применение критериев KPSS [26] и Дики—Фуллера для рядов с вычтенным временным трендом показало (табл. 9), что для всех рассмотренных временных рядов выполняется условие стационарности. Причем стационарность подтверждается обоими критериями.

Таблица 9

Величины оценки тестов KPSS и Дики-Фуллера для рядов без линейного тренда и результаты («+» — нулевая гипотеза не отвергается, «-» — отвергается) сравнения с критическими значениями для уровня значимости 0,05: 0,46 для KPSS и -2,86 для Дики—Фуллера

Scores for the KPSS and Dickey—Fuller tests for series without a linear trend and results («+» — null hypothesis is accepted, «-» — null hypothesis is rejected) of the comparisons with critical values for a significance level of 0,05: 0,46 for KPSS and -2,86 for Dickey-Fuller

	Критерий KPSS		Критерий Дики—Фуллера		Вывод
	Значение	Результат	Значение	Результат	
Уровни воды					
ГП Калининград-РП	0,17	+	−9,43	−	Ряды стационарны
ГП Преголя-Гвардейск	0,14	+	−7,64	−	
ГП Дейма-Полесск	0,12	+	−13	−	
ГП Открытое	0,15	+	−10,34	−	
ГП Краснофлотское	0,09	+	−11,39	−	

Окончание табл. 9

	Критерий KPSS		Критерий Дики—Фуллера		Вывод
	Значение	Результат	Значение	Результат	
Расходы воды					
р. Преголя	0,05	+	−9,56	−	Ряды стационарны
Рукав Дейма	0,09	+	−8,27	−	
Рукав Нижняя Преголя	0,03	+	−10,89	−	
Доля Нижней Преголи	0,15	+	−16,57	−	
Доля Деймы	0,15	+	−16,57	−	

При проверке рядов с помощью KPSS теста, рассчитанные значения критерия теста меньше критического значения 0,46 при уровне значимости 0,05. Данный факт приводит к принятию нулевой гипотезы о стационарности ряда. Значения критерия для теста Дики—Фуллера принимали значения меньше критического (–2,86) при уровне значимости 0,05. Таким образом, гипотеза о наличии в ряде единичного корня отвергается, и, следовательно, ряд можно рассматривать как стационарный.

3.7. Оценка нестационарности средних значений и дисперсий.

Насколько ряды уровня и расхода стационарны с точки зрения выборочных средних и дисперсии, т. е. можно ли оценивать средние значения и дисперсии, пользуясь только половиной этих рядов?

Для ответа был проведен анализ стационарности выборочных средних и дисперсии на основе использования критериев Стьюдента и Фишера [21, с. 84—90] для двух частей рядов аномалий уровня без тренда $H_r(t)$ для всех анализируемых гидропостов (табл. 10): первый период включал 2002—2007 гг. и март 2016 — конец 2017 гг. ($m = 5724$ значений), второй период — с начала 2008 г. по февраль 2016 гг. ($n = 5903$ значений), когда измерения на ГП Преголя-РП отсутствовали.

Величины критерия Стьюдента (табл. 10) для всех гидропостов больше его критического значения ($T_{кр} = 1,96$). Это означает, что ряды нестационарны по средним значениям. Напротив, анализ критерия Фишера (табл. 10) показал, что величины критерия меньше критического значения ($F_{кр} = 1,32$). Поэтому мы можем полагать, что данные ряды являются стационарными по дисперсии.

Таблица 10

Величины критериев Стьюдента (T , стационарность по среднему значению) и Фишера (F , стационарность по дисперсии) для уровней воды на ГП-ах Преголя-Гвардейск, Дейма-Полесск, Открытое, Краснофлотское

The values of the Student's (T , mean stationary) and Fisher's (F , dispersion stationary) criteria for the water levels in HS Pregolya-Gvardeysk, Deyma-Polessk, Otkrytoe, Krasnoflotskoe

Критерий	Преголя-Гвардейск		Дейма-Полесск		Открытое		Краснофлотское	
	T	F	T	F	T	F	T	F
	8,63	1,24	9,40	1,32	9,98	1,36	7,84	1,11

Примечание. Случаи стационарности отмечены жирным шрифтом.

Применению аналогичного анализа для стока рукавов Нижней Преголи и Деймы предшествовала визуальная оценка (рис. 8), которая выявила, что на рубеже 2000 г. перераспределение стока р. Преголи между двумя ее рукавами изменилось — увеличилось число случаев перераспределения стока в пользу рукава Деймы. Учитывая этот факт и то, что анализ стационарности по средним и дисперсиям на основе критериев Стьюдента и Фишера должен проводиться между выборками примерно равного объема [21], весь ряд был разделен на три равные части: 1990—1999 гг. (выборка 1), 2000—2009 гг. (выборка 2) и 2010—2019 гг. (выборка 3). Для каждой этой выборки были рассчитаны среднее значение и дисперсия, а затем величины критериев Стьюдента и Фишера (табл. 11) для каждой пары выборок (согласно [21], с. 84—90).

Сравнение с критическими значениями ($T_{кр} = 1,96$, $F_{кр} = 1,32$, уровень значимости 0,05) показало, что условия стационарности ($t < T_{кр}$ и $f < F_{кр}$) соблюдаются для дисперсий расходов (без тренда), но в большей части случаев не соблюдаются для средних значений этих величин. Это означает, что кроме линейного тренда на временные ряды действует еще какой-то фактор, обеспечивающий нестационарность средних значений, причем, этот фактор может приводить к периодичности, т. е. стационарность по средним выявлена между выборками 1 и 3.

Для доли перераспределения стока между рукавами стационарность наблюдается по средним значениям, а существенная нестационарность — по дисперсиям. Очевидно, на рубеже 2000 г. какой-то процесс повлиял на закономерность перераспределения стока между рукавами.

Таблица 11

Величины критериев Стьюдента (T , стационарность по среднему значению) и Фишера (F , стационарность по дисперсии) для расходов воды (без тренда) в реке Преголе и рукавах Нижняя Преголя и Дейма (в абсолютном выражении и % перераспределения) для трех периодов: 1990—1999 гг. (выборка 1), 2000—2009 гг. (выборка 2) и 2010—2019 гг. (выборка 3)

Values of Student's (T , mean stationary) and Fisher's (F , dispersion stationary) criteria for water discharges (without a trend) in the Pregolya River and the Nizhnyaya Pregolya and Deyma branches (in absolute terms and % of the redistribution) for three periods: 1990—1999. (subseria 1), 2000—2009 (subseria 2) and 2010—2019 (subseria 3)

Критерий	Река Преголя		Нижняя Преголя		Дейма		% Нижней Преголи		% Деймы	
	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Выборки 1 и 2	3,01	1,20	6,99	1,29	1,38	1,19	1,87	1,90	1,87	1,90
Выборки 1 и 3	0,60	1,10	1,94	1,06	0,78	1,19	0,54	3,24	0,54	3,24
Выборки 2 и 3	3,71	1,09	5,04	1,22	2,26	1,00	0,92	1,71	0,92	1,71

Примечание. Случаи стационарности отмечены жирным шрифтом.

4. Обсуждение

Обсуждение нормальности распределений величин уровня и расходов воды. Соответствие значений любого временного ряда нормальному распределению является необходимым условием применения статистических оценок, поэтому

ниже обсуждается степень соответствия рядов исходных данных нормальному распределению.

Для статистических распределений уровня воды на всех гидрологических постах величина асимметрии As имеет только положительные значения (табл. 12), и, следовательно, среднее значение Avr больше медианы Me . Все статистические распределения (за исключением РГП Преголя-Гвардейск) имеют оценки асимметрии (As) сравнительно мало отличающиеся от нуля за исследуемые периоды, т. е. можно полагать, что анализируемые выборки значений уровня воды близки к нормальному распределению [21].

Статистическое распределение для РГП Преголя-Гвардейск существенно более ассиметрично. Коэффициент асимметрии (As) для всех трех анализируемых периодов (табл. 12) почти в два раз превышает аналогичные значения для других гидрологических постов. Это говорит о том, что массив измерений уровня включает немногочисленные, но большие по величине положительные отклонения от среднего значения уровня, и более многочисленные, но менее значительные отрицательные отклонения [21].

Статистические распределения для расходов воды р. Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы имеют сравнительно большие оценки асимметрии (As) и разности среднего значения (Avr) и медианы (Me) за период 1990—2020 гг.: As — 3; 4,5 и 1,5, а разность ($Avr - Me$) — 29,5; 18,4 и 10,2 соответственно, что обеспечивает [21] отклонение этих распределений от нормального.

В дополнение, для проверки подчиненности рядов уровня и расходов воды нормальному закону распределения были проведены расчетные, графические и косвенные тесты с использованием программного продукта Statistica. Форма гистограмм при оценках критерия по Колмогорову—Смирнову (KS-тест) [30] близки к теоретически нормальной кривой Гаусса, а критерий Шапиро—Уилка [31] для уровней воды на всех гидрологических постах больше 0,05, что в совокупности подтверждает близость к нормальности и для распределения величин уровня воды на гидрологических постах системы. Для расходов воды критерий Шапиро—Уилка [31] на всех трех водотоках меньше 0,05, что подтверждает плохое соответствие величин расхода воды р. Преголи и ее рукавов нормальному распределению.

Таблица 12

Величины асимметрии (As) и разностей средних значений (Avr) и медиан (Me) для распределений аномалий уровня воды на гидрологических постах за исследуемые периоды

The values of asymmetry (As) and differences of mean values (Avr) and medians (Me) for distributions of water level anomaly at hydrological stations for the studied periods

Гидрологический пост	2002—2017 гг.		2002—2007 гг. и 2016—2017 гг.		2008—2016 гг.	
	$Avr - Me$ (см)	As (б/п)	$Avr - Me$ (см)	As (б/п)	$Avr - Me$ (см)	As (б/п)
МГП Калининград-РП	2	0,7	2	0,7	—	—
РГП Преголя-Гвардейск	19	1,3	23	1,3	15	1,3
РГП Дейма-Полесск	3	0,8	4	0,9	2	0,6
МГП Краснофлотское	2	0,4	2	0,5	1	0,3
МГП Открытое	1	0,7	3	0,8	0	0,4

Оценки тренда. В течение исследуемого периода зафиксирован существенный статистически значимый положительный тренд роста уровня воды на всех гидрологических постах (рисунки 2—6, табл. 5). Добавим, что положительные тренды в уровне отмечаются и для других прибрежных районов Балтики [32, 33]. За исследуемый 16-летний период (2002—2017 гг.) наибольший тренд роста уровня воды был на ГП Преголя-Гвардейск (изменения по тренду составили 27,5 см), а наименьший — на ГП Открытое (изменения по тренду — 4,7 см), т. е. практически шестикратная разница роста уровней. Подобный рост в среднем примерно соответствует результатам (порядка 5—15 мм/год) ранее проведенных исследований роста уровня воды в юго-восточной Балтике [16, 20].

Оценка влияния пропуска в данных ГП Калининград-РП на статистические характеристики временной изменчивости уровня воды. Данные на ГП Калининград-Рыбный порт отсутствуют за большой период (с января 2008 г. по февраль 2016 г.). Возникает вопрос — можно ли оценить базовые статистики (среднее значение и стандартное отклонение относительно трендовой составляющей) для уровня воды на этом гидропосту, основываясь только на данных 2002—2007 гг.?

В разделе 3.4 показано, что статистические характеристики за два рассматриваемые периода для МГП Краснофлотское, Открытое и РГП Полесск (корреляция с которыми у РГП Калининград-РП наиболее высока) имеют достаточно близкие значения. Также в разделе 3.6 на основании применения критериев KPSS и Дики—Фуллера было показано, что ряды данных по аномалиям уровня воды (без тренда) являются стационарными. Очевидно, все статистики, оцененные для периода проведения измерений на РГП Калининград-РП, можно экстраполировать на весь период наблюдений 2002—2017 гг., однако анализ на стационарность рядов по средним и дисперсии (раздел 3.7, критерии Стьюдента и Фишера) показал, что только характеристики дисперсии можно на уровне значимости 0,05 применить для всего периода.

Сравнение статистических характеристик колебаний уровня за период 2007—2017 гг. Если величины размаха (амплитуда) колебания уровня воды на гидрологических постах МГП Калининград-РП, МГП Открытое, МГП Краснофлотское, РГП Дейма-Полесск сопоставимы друг с другом, то размах колебаний значений уровня воды для РГП Преголя-Гвардейск в среднем в 2 раза превышает размахи колебаний для других постов. Такие большие колебания уровня на РГП Преголя-Гвардейск, а также несогласованность с колебаниями уровня в устьевых постах, создают благоприятные условия для возникновения перепадов уровня между Гвардейском (узловой точкой речной системы) и устьями рукавов Нижней Преголи и Деймы. В свою очередь, это может создать условия для перетока вод между Калининградским и Куршским заливами через эти рукава.

Величина размаха колебания дает лишь самое общее представление об изменчивости, так как показывает, насколько отличаются друг от друга крайние значения, но не указывает, насколько велики отклонения отдельных значений внутри ряда [21]. В нашем случае для ГП Преголя-Гвардейск, величина интерквартильного расстояния составляет только 13—20 % относительно размаха для всех

гидрологических постов (табл. 2), и именно в эти пределы по определению входит 50 % измеренных величин уровня [21].

Можно сказать, что для вариаций уровня воды в точке разветвления р. Преголи на два рукава (ГП Преголя-Гвардейск) типичен речной режим: колебания имеют значительный размах по сравнению с дисперсией, отмечается высокий коэффициент асимметрии, в течение каждого года явно выделяются гидрологические фазы (паводок, половодье, межень). Вариации уровня на устьевых постах (Калининград-РП и Дейма-Полесск) имеют значительно меньший размах, хорошо коррелируют (коэффициенты корреляции 0,62 и 0,93 соответственно) с аналогичными значениями уровня в Калининградском / Вислинском и Куршском заливах, имеют временной ход более схожий с колебаниями уровня моря, чем реки (распределение близко к нормальному, со слабо выраженной асимметрией).

Можно высказать предположение, что основное влияние на величину размаха уровня воды на РГП Преголя-Гвардейск оказывает сток р. Преголи, на других же гидрологических постах влияние на изменчивость уровня воды оказывает уровень воды в Калининградском и Куршском заливах, но для его подтверждения требуется отдельный анализ.

Корреляции временного хода уровня воды. Коэффициенты корреляции между временными рядами колебаний уровня воды (без учета тренда) на гидрологических постах за период 2002—2017 гг. лежат в пределах 0,36—0,95 (табл. 7). Это указывает на существование как внешних общих факторов, определяющих некоторую синхронность колебаний, так и на наличие локальных факторов, определяющих индивидуальные черты в поведении уровня.

Почти функциональная корреляционная связь ($r = 0,97$) между МГП Краснофлотское (Калининградский / Вислинский залив) и МГП Открытое (Куршский залив) свидетельствует об одинаковом влиянии Балтийского моря на оба залива на больших масштабах времени, и схожести поведения уровня заливов при местном ветровом воздействии. Эта же причина обуславливает высокую (0,71 и 0,79) и заметную (0,65) связи между всеми морскими и устьевыми постами — МГП Краснофлотское, Калининград-РП, РГП Дейма-Полесск и МГП Открытое).

Корреляционная связь между МГП Калининград-РП и РГП Преголя-Гвардейск является значимой ($r = 0,42$), но она существенно слабее связи между МГП Калининград-РП и МГП Краснофлотское ($r = 0,62$).

Хотя МГП Калининград-РП и МГП Краснофлотское принадлежат акватории Калининградского залива, но на уровень воды в них влияют разные факторы. Колебания уровня воды в МГП Краснофлотское следуют за колебаниями уровня Балтийского моря за счет затоков вод в залив при подъемах уровня Балтики и оттоке вод при падении этого уровня¹ [34]. На уровень в МГП Калининград-РП сильное влияние оказывает денивеляция уровня залива во время локального действия ветра, который нагоняет воды залива в сторону устья Преголи, производя

¹ Эти подъемы и спады уровня моря в районе входа в Калининградский залив могут быть вызваны нагоном, (сгоном) вследствие действия местного ветра, сгонно-нагонными перемещениями вод всей Балтики, действием барических полей и собственными колебаниями Балтийского моря [34].

в то же время сгон на МГП Краснофлотское. Таким образом, на МГП Калининград-РП (устье р. Преголи) проявляется одновременно влияние колебаний уровня в Калининградском заливе, нагонных ветров и речного стока. Эта комбинация факторов обеспечивает существенную индивидуальность для характеристик колебаний уровня воды в устье рукава Нижняя Преголя.

Высокая корреляционная связь ($r = 0,95$) между РГП Дейма-Полесск и МГП Открытое связана с географической близостью постов (6 км), вследствие чего один и тот же фактор (уровенный режим Куршского залива) влияет на колебания уровня рукава Деймы в Полесске. Но заметная корреляционная связь ($r = 0,67$) между РГП Дейма-Полесск и РГП Преголя-Гвардейск свидетельствует, что речное влияние в устье рукава Деймы остается достаточно существенным.

Расход воды р. Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы по данным гидрологических наблюдений за период 1990—2020 гг. Средний расход воды на постах р. Преголи (г. Гвардейск) и ее рукава Деймы (г. Гвардейск) за исследуемый период составил 81,1 и 34,6 м³/с соответственно. Рассчитанное среднее значение расхода воды рукава Нижней Преголи (ниже г. Гвардейск) 46,7 м³/с в процентном соотношении от общего водотока р. Преголи (до разветвления в г. Гвардейске) составило: рассчитанный водоток рукава среднего и слабого Преголи (ниже г. Гвардейск) — 54,2 %, а расходы, измеренные на ГП Дейма-Гвардейск, — 45,8 % (табл. 6).

Также важно отметить очень высокую изменчивость расхода воды за указанный период (рис. 7). Величины расхода воды меняются более чем в сто раз (табл. 6): р. Преголя — от 7,3 до 841 м³/с (размах 833,7 м³/с), рукав Нижняя Преголя — от –11,6 до 665 м³/с (размах 676,6 м³/с), рукав Дейма — от 1,3 до 185 м³/с (размах 183,7 м³/с). Пики максимальных значений расходов воды всех трех водотоков возникают в периоды обложных дождей и мощных паводков.

Выявлено, что повторяемости значений расхода воды р. Преголи в период 1990—2020 гг. распределились следующим образом: 48 % — расход ≤ 50 м³/с, 26 % — расход в промежутке 50—100 м³/с, 24 % — расход в промежутке 100—400 м³/с, и только 2 % при расходе ≥ 400 м³/с. Максимумы расхода воды приходятся на периоды весеннего половодья и паводочных дождей.

Перераспределение стока между рукавами Нижняя Преголя и Дейма. Анализ всего массива данных по расходам воды на постах показал (рис. 11), что при высоких расходах р. Преголи, например, ≥ 400 м³/с, основную часть поступающего стока берет на себя рукав Нижняя Преголя, причем, чем более интенсивен поступающий сток, тем больше эта доля в пользу Нижней Преголи. Доля рукава Деймы постепенно в среднем повышается при ослаблении стока р. Преголи.

Для подавляющего большинства случаев среднего и слабого стока р. Преголи (расход ≤ 100 м³/с) перераспределение между рукавами Нижняя Преголя и Дейма не зависит от величины подходящего стока, поэтому определяется другими факторами, возможно, соотношением уровня в приемных водоемах и действием местного ветра на поверхность рукавов.

При очень слабом стоке р. Преголи, условно менее 40—50 м³/с, основной сток реки может преимущественно направляться в один из рукавов почти в равной

степени, но междуручавные перетоки также происходят при низких значениях приходящего стока Преголи.

Выявлено (раздел 3.7), что доля перераспределения расхода р. Преголи между рукавами (Нижняя Преголя и Дейма) нестационарна и смена режима произошла где-то на рубеже 2000 г. Возникает предположение, что это могло произойти за счет каких-либо преобразований в руслах. На наш взгляд, таким преобразованием является установка на реке в 2001 г. научно-исследовательского судна «Космонавт Виктор Пацаев» в рамках развития комплекса Музея Мирового океана в г. Калининграде. В настоящий момент проходное сечение реки заужено стоящими у стенки судами на набережной исторического флота Музея Мирового океана примерно на 20—30 % на протяжении примерно 500 м.

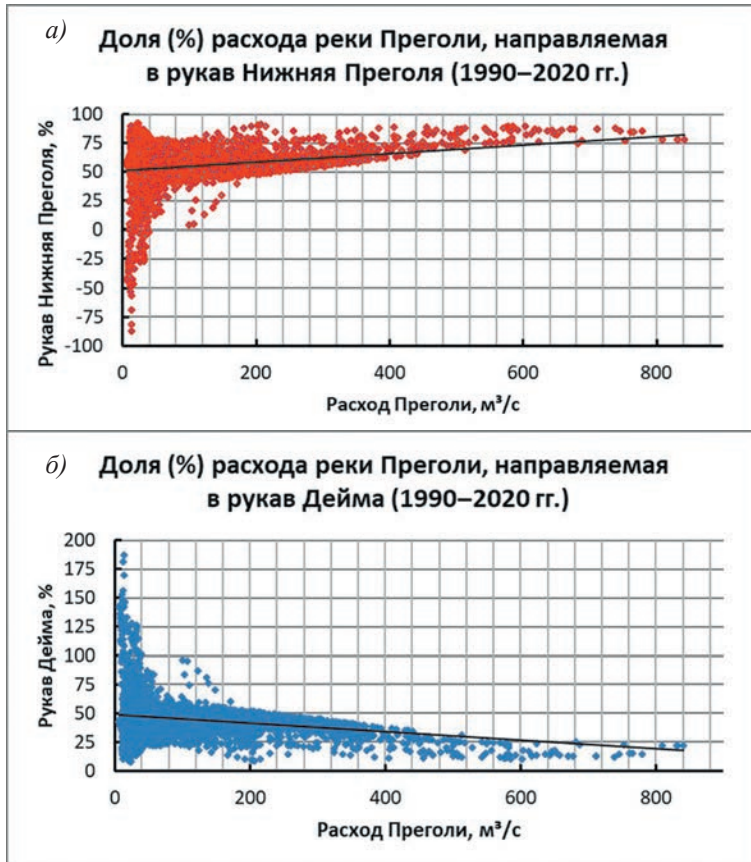


Рис. 11. Доли от общего приходящего расхода р. Преголи, которые берут на себя рукава Нижняя Преголя (а) и Дейма (б) для периода 1990—2020 гг.

Fig. 11. Shares of the total incoming discharge of the Pregolya River, which are taken over by the branches: Downstream Pregolya (a) and Deyma (b), for the period 1990—2020.

Выводы

Устьевая область р. Преголи включает в себя устьевой участок рукава Нижней Преголи, Калининградский залив, устьевой участок рукава Деймы и Куршский залив. В работе впервые рассмотрены характеристики изменчивости уровня (2002—2017 гг.) и расходов воды (1990—2020 гг.) для этих водотоков на основе регулярных данных. Не повторяя полученных в работе количественных оценок, сформулируем следующие качественные выводы об имеющихся наиболее интересных особенностях в динамике этих характеристик.

Для всей рассматриваемой области существует статистически значимый положительный линейный тренд уровня воды (табл. 7), причем, если для устьевых постов и постов в заливах он сравним со значениями для прибрежной зоны юго-восточной Балтики (5—15 мм/год, [15, 16]), то для точки разветвления р. Преголи на два устьевых рукава (рукав Нижняя Преголя — в сторону Калининградского / Вислинского залива, рукав Дейма — в сторону Куршского залива) он в 2—3 раза выше, чем для постов в заливах.

Характер изменчивости уровня воды в точке разветвления р. Преголи на два рукава соответствует речному режиму — существенный размах, высокий коэффициент асимметрии, в течение каждого года явно выделяются гидрологические фазы (паводок, половодье, межень). Вариации уровня на устьевых постах (Калининград-РП и Полесск) имеют значительно меньший размах, сильно зависят от уровня воды в приемных водоемах — Калининградском / Вислинском и Куршском заливах (коэффициенты корреляции 0,62 и 0,93 соответственно), и имеют временной ход более схожий с колебаниями уровня моря, чем реки (распределение близко к нормальному, со слабо выраженной асимметрией).

Несогласованность между колебаниями уровня в точке ветвления р. Преголи на рукава и устьях рукавов Нижней Преголи и Деймы, создают благоприятные условия для возникновения перепадов уровня (как положительных, так и отрицательных) между точкой ветвления и устьями, что в свою очередь может вызвать перетоки вод между заливами через устьевые рукава р. Преголи.

Хотя применение статистических критериев (KPSS и Дики—Фуллера) показало, что ряды данных для аномалий уровня воды (без тренда) являются стационарными, и, соответственно, статистики, оцененные для периода проведения измерений на РГП Калининград-РП (2002—2007 гг.), можно экстраполировать на весь период наблюдений 2002—2017 гг., анализ на стационарность рядов по средним и дисперсии (раздел 3.7, критерии Стьюдента и Фишера) показал, что для всего периода стационарность отмечается только для дисперсии (для уровня значимости 0,05).

Большую часть поступающего стока р. Преголи берет на себя рукав Нижняя Преголя, причем, чем более интенсивен поступающий сток, тем большая доля этого стока попадает в этот рукав. Доля стока, уходящего в рукав Дейма, постепенно (в среднем) повышается при ослаблении стока Преголи.

При очень слабом стоке р. Преголи ее воды могут преимущественно направляться в один из рукавов в зависимости от уровня в приемных водоемах, а межу рукавные перетоки (из Нижней Преголи в Дейму) также происходят только при низких значениях приходящего стока Преголи.

Выявлено, что доля перераспределения стока р. Преголи между рукавами (Нижняя Преголи и Дейма) существенно нестационарна по дисперсии, и смена режима произошла где-то на рубеже 2000 г. На наш взгляд, причиной этого могло послужить сужение проходного сечения рукава Нижней Преголи в г. Калининграде, когда на набережной исторического флота Музея Мирового океана была завершена установка группы судов (2001 г.), которые заузили сечение примерно на 20—30 % на участке длиной около 500 м.

Список источников

1. Кушевки В., Люкс К., Чубаренко Б. В., Гуменюк И. С., Баранова Ю. В., Кошелев В. Н. Возможные сценарии устойчивого развития. // Регион Калининградского / Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2014. С. 187—195.
2. Великанов Ю. А. Гидрология суши. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1948. 528 с.
3. Малая энциклопедия Забайкалья: Природное наследие. Новосибирск: Наука, 2009. 698 с.
4. Чубаренко Б. В., Боскачёв Р. В. Возможность перетока вод в системе «Калининградский залив – река Преголи – Куршский залив» // Процессы в геосредах. 2018. № 2 (15). С. 911—919.
5. Бергаланфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. М.: Наука, 1973. С. 22—38.
6. Chubarenko B., Boskachev R. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea. // Baltica. 2021. Vol. 34 (1). P. 81—94. doi: 10.5200/baltica.2021.1.7.
7. Боскачёв Р. В., Чубаренко Б. В. Среднегодовые расходы воды в реках Преголи и Дейма в 1990—2020 гг. // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8(110—1). С. 176—183. doi: 10.23670/IRJ.2021.110.8.030.
8. Домнин Д. А., Чубаренко Б. В. Трансграничные водосборы Юго-восточной Балтики // Геогр. и прир. ресурсы. 2012. № 3. С. 69—76.
9. Маркова Л. Л., Нечай И. Я. Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи // Труды ГОИН. 1960. Вып. 49. С. 118—187.
10. Chubarenko B., Domnina D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmantov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6) // The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World (Ed. R. Kosjan). Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
11. Силич М. В. Водный баланс залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 143—172.
12. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. О повышении среднегодовых и сезонных значений уровня воды в устьевой части реки Преголи (Балтийское море) по данным 1996—2015 гг. // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149, № 2. С. 16—30.
13. Jensen J., Wahl T., Muddersbach C. Sea level variations at the German North Sea and Baltic Sea coastlines // COPEDEC VII. UAE: Dubai. 2008. No. 99. P. 1—12.
14. Prussak Z., Zavadzka E. Potential implications of sea level rise for Poland // Journal of Coastal Res. 2008. Vol. 24 (2). P. 410—422.
15. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. О повышении уровня моря в российской части Вислинского залива // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 57—67.
16. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Тенденции изменения уровня моря в лагунах юго-восточной Балтики. // Океанология. 2013. Т. 53 (1). С. 17—28.
17. Павловский А. А., Шамшурин В. И. Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 681—693.
18. Малинин В. Н. Изменения уровня Мирового океана и климата // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 100—115.
19. Чубаренко Б. В., Шкуренок В. И. Физические механизмы проникновения соленых вод вверх по реке Преголе с учетом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2001. Вып. 7. С. 80—88.

20. Стонт Ж. И., Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // *Океанологические исследования*. 2020. Т. 48, № 1. С. 45—61.
21. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
22. Таблица критических значений t-критерия Стьюдента. URL: <https://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica> (дата обращения: 20.08.2022).
23. МИ 1759-87. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом скорость—площадь. М.: Издательство стандартов, 1987. 28 с.
24. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб: ГГИ, 2010. 162 с.
25. Dickey D. A. Stationarity Issues in Time Series Models. // *Proc. SUGI-30. Paper 192-30*. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/192-30-stationarity-issues-in-time-series-models-1db2b6.html> (дата обращения: 21.09.2022).
26. Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? // *Journal of Econometrics*. 1992. Vol. 54 (1–3), P. 159—178. doi: 0.1016/0304-4076(92)90104-Y.
27. Fuller W. A. *Introduction to Statistical Time Series* (2nd edition). New York: John Wiley and Sons, 1995. URL: <https://www.wiley.com/enus/Introduction+to+Statistical+Time+Series+%2C+2nd+Edition-p-9780471552390#description-section> (дата обращения: 20.08.2022).
28. Seabold S., Perktold J. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python // *Proc. 9th Python in Science Conference (SCIPY 2010)*. 2010. Vol. 92-96. doi: 10.25080/Majora-92bf1922-011.
29. Алиева И. С. Пространственно-временные закономерности поверхностного стока рек Большого Кавказа // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 58. С. 41—48.
30. Daniel W. W. Kolmogorov—Smirnov test with one sample // *Applied Nonparametric Statistics* (2nd ed.). Boston: PWS-Kent, 1990. P. 319—330.
31. Shapiro S. S., Wilk M. B. Analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. 1965. Vol. 52(3-4). P. 591—611.
32. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Митина Ю. В., Шевчук О. И. Результаты исследований уровня моря в РГГМУ // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 60. С. 269—305.
33. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. СПб.: РГГМУ, 2014. 180 с.
34. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula Lagoon. [In] *Ecology of Baltic Coastal Waters*. U. Schiewer (Ed.) *Ecological studies (analysis and synthesis)*. Issue 197. Berlin: Springer, 2008. P. 167—195.

References

1. Kushevski V., Lyuks K., Chubarenko B. V., Gumenyuk I. S., Baranova Yu. V., Koshelev V. N. Possible scenarios of sustainable development. *Region Kaliningradskogo / Vislinskogo zaliva: sovremennoe sostoyanie i scenarij razvitiya = Kaliningrad / Vislinsky Bay Region: current state and development scenario*. Kaliningrad: BFU im. I. Kanta, 2014:187—195. (In Russ.)
2. Velikanov M. A. *Gidrologiya sushi = Hydrology of the land*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1948: 528 p. (In Russ.)
3. *Malaya enciklopediya Zabajkal'ya: Prirodnoe nasledie = Small Encyclopedia of Transbaikalia: Natural Heritage*. Novosibirsk: Science, 2009: 698 p. (In Russ.)
4. Chubarenko B. V., Boskachev R. V. The possibility of water flow in the system “Kaliningrad Lagoon – Pregolya River – Curonian Lagoon”. *Processy v geosredah = Processes in geomedia*. 2018;2(15):911—919. (In Russ.)
5. Bertalanffy L. History and status of the general theory of systems. *System research. Science*. 1973:20—38.
6. Chubarenko B. V., Boskachev R. V. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea. *Baltica*. 2021;1(34):81—94. doi: 10.5200/baltica.2021.1.7.

7. Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Average annual water flow in the Pregolya and Deyma rivers in 1990—2020. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2021;8(110-1):176—183. doi: 10.23670/IRJ.2021.110.8.030. (In Russ.).
8. Domnin D. A., Chubarenko B. V. Transboundary catchments of the South-eastern Baltic. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2012;(3):69—76. (In Russ.).
9. Markova L. L., Nechay I. Y. Hydrological essay of the mouth areas of the Neman and Pregolya Rivers. *Trudy GOIN = Proceedings of the RSOI*. 1960;(49):118—187. (In Russ.).
10. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmanov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). *The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World* (Ed. R. Kosjan). Springer International Publishing. Switzerland, 2017:149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
11. Silich M. V. Water balance of the lagoon. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva = Hydro-meteorological regime of the Vistula Lagoon*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971:143—172. (In Russ.).
12. Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. On the increase in the average annual and seasonal values of the water level in the estuary of the Pregolya River (Baltic Sea) according to the data of 1996—2015. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Izvestiya Russian Geographical Society*. 2017;149(2):6—30. (In Russ.).
13. Jensen J., Wahl T., Muddersbach C. Sea level variations at the German North Sea and Baltic Sea coastlines. *COPEDEC VII. UAE: Dubai*. 2008;(99):1—12.
14. Prussak Z., Zavadzka E. Potential implications of sea level rise for Poland. *Journal of Coastal Res.* 2008;24(2):410—422.
15. Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Sea level rise in the Russian part of the Vistula Lagoon. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2012;(1):57—67. (In Russ.).
16. Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Trends in sea level changes in the lagoons of the Southeastern Baltic. *Okeanologiya = Oceanology*. 2013;53(1):17—28. (In Russ.).
17. Pavlovskij A.A., SHamshurin V.I. The impact of the Baltic Sea level rise on the historical and cultural heritage of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(65):681—693. (In Russ.).
18. Malinin V. N. Changes in the level of the world ocean and climate. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2015;(41):100—115. (In Russ.).
19. Chubarenko B. V., Shkurenko V. I. Physical mechanisms of salt water penetration up the Pregole River taking into account the influence of the bottom relief. *Fizicheskie problemy ekologii (ekologicheskaya fizika) = Physical problems of ecology (ecological physics)*. 2001;(7):80—88. (In Russ.).
20. Stont J. I., Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Long-term trends in the variability of hydrometeorological characteristics in the Kaliningrad region. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2020;48 (1):45—61. (In Russ.).
21. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
22. *Tablitsa kriticheskikh znachenii t-kriteriya St'udenta = Table of critical values of the Student's t-test*. Available at: <https://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica> (accessed: 30.07.2022).
23. *MI 1759-87. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Raskhod vody na rekah i kanalah. Metodika vypolneniya izmerenij metodom sskorost' — ploshchad' = The state system of ensuring the uniformity of measurements of water flow on rivers and canals. The methods of performing measurements by the speed — area method*. Moscow: Publishing House of Standards, 1987: 28 p. (In Russ.).
24. *Metodicheskie rekomendatsii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik i opredeleniyu ih raschetnykh znachenij po neodnorodnym dannym = Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values from heterogeneous data*. St. Petersburg: State Hydrological Institute, 2010: 162 p. (In Russ.).
25. Dickey D. A. Stationarity Issues in Time Series Models. Proc. SUGI-30: 192-30. Available at: <https://pdf4pro.com/amp/view/192-30-stationarity-issues-in-time-series-models-1db2b6.html> (accessed: 30.09.2022).

26. Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics*. 1992;(54):159—178. doi: 0.1016/0304-4076(92)90104-Y.
27. Fuller W. A. Introduction to Statistical Time Series (2nd edition). New York: John Wiley and Sons. Available at: [https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Statistical+Time+Series %2C +2nd +Edition-p-9780471552390#description-section](https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Statistical+Time+Series+%2C+%2nd+Edition-p-9780471552390#description-section) (accessed: 30.07.2022).
28. Seabold S., Perktold J. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. *Proc. 9th Python in Science Conference (SCIPY 2010)*. 2010;(92-96). doi: 10.25080/Majora-92bf1922-011.
29. Alieva I. S. Spatio-temporal regularities of the surface runoff of the rivers of the Greater Caucasus. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2020;(58):41—48. (In Russ.).
30. Daniel W. W. Kolmogorov-Smirnov test with one sample. *Applied Nonparametric Statistics (2nd ed.)*. Boston: PWS-Kent. 1990:319—330.
31. Shapiro S. S., Wilkes M. B. Test of variance analysis for normality (complete samples). *Biometrics*. 1965;52(3—4):591—611. doi: 10.1093/biomet/52.3—4.591.
32. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Mitina Yu. V., Shevchuk O. I. Results of sea level studies at RSMU. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2020;(60):269—305. (In Russ.).
33. Gordeeva S. M., Malinin V. N. *Izmenchivost' morskogo urovnya Finskogo zaliva = Gulf of Finland sea level variability*. St. Peterburg: RSHU, 2014: 180 p. (In Russ.).
34. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula Lagoon. *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological studies (analysis and synthesis)*. Berlin: Springer, 2008;(197):167—195.

Информация об авторах

Руслан Владимирович Боскачёв, соискатель на ученую степень кандидата географических наук, Калининградский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — филиал ФГБУ «Северо-Западное управление УГМС», Калининград, 236000, ул. Пугачёва 16, Российская Федерация, combat.130@mail.ru.

Борис Валентинович Чубаренко, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. прибрежных систем, Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), г. Москва, 117997, Нахимовский пр., д. 36, Российская Федерация, chuboris@mail.ru.

Information about authors

Ruslan V. Boskachev, Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Pugacheva, 16, 236000, Kaliningrad, Russia.

Boris V. Chubarenko, PhD, Head of Laboratory for Coastal Systems Study, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (IO RAS), 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 19.08.2022

Принята к публикации после доработки 27.11.2022

The article was received on 19.08.2022

The article was accepted after revision on 27.11.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 675—690.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):675—690.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.466.3:001.891.573](268.52)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-675-690

Анализ штормовой активности в Карском море по данным волновой модели WAVEWATCHIII

***Елизавета Евгеньевна Круглова^{1, 2},
Станислав Александрович Мысленков^{2, 3, 4}***

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

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

³ Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва

⁴ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

Аннотация. В статье выполнен анализ штормовой активности в Карском море, основанный на данных моделирования ветрового волнения по модели WAVEWATCHIII за период с 1979 по 2019 г. В качестве исходных данных использовались данные о ветре и концентрации льда из реанализов NCEP/CFSR/CFSv2. Вычисления выполнялись на неструктурной вычислительной сетке с разрешением от 700 м до 20 км. Выполнен анализ повторяемости случаев штормового волнения. Обнаружены положительные тренды для штормов с критериями 2—5 м за период с 1979 по 2019 г. Найден положительный значимый тренд для продолжительности штормов высотой > 2 м, равный 5 ч / 10 лет. Установлены два основных района группировки штормов: граница с Баренцевым морем и восточнее Карских ворот.

Ключевые слова: штормовая активность, ветровые волны, WAVEWATCHIII, Карское море, моделирование волнения.

Благодарности. Работа С. А. Мысленкова выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Работа Е. Е. Кругловой подготовлена в рамках выполнения темы № FMWE-2021-0002 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Для цитирования: Круглова Е. Е., Мысленков С. А. Анализ штормовой активности в Карском море по данным волновой модели WAVEWATCHIII // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 675—690. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-675-690.

Analysis of storm activity in the Kara Sea according to the wave model WAVE WATCH III

Elizaveta E. Kruglova^{1, 2}, Stanislav A. Myslenkov^{2, 3, 4}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, lissavetaandin@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

³ P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

⁴ Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Moscow

Summary. The article analyzes storm activity in the Kara Sea, based on the data of wind wave modeling using the WAVEWATCHIII model for the period from 1979 to 2019. Wind and ice concentration data from NCEP/CFSR/CFSv2 reanalysis were used as initial data. Calculations were performed on a non-structural computational grid, covering the Barents and Kara Seas, as well as the entire northern part of the Atlantic Ocean. The spatial resolution varies from ~ 700 m in the coastal zone of the Kara Sea, to ~ 20 km in the open part of the Kara Sea. The Peak Over Threshold (POT) technique was used to analyze storm activity in the Kara Sea. The calculation method is as follows: setting a criterion (in our case, wave heights from 2 to 6 m), followed by calculating the number of transitions of the studied value through the criterion. The event (storm) begins when the criterion is exceeded and ends with the reverse transition through the criterion (down). The duration of the event was calculated as the difference between the start and end time of the event. The data obtained on the number of storms per year based on a multi-year and seasonal multi-year sample were checked for trends, the linear regression model being used as trends. To assess trends for significance, an analysis was carried out on the adequacy of regression models according to the Fisher criterion. It was found that the number of storms with a height of > 2 meters increased by more than 2 times during the period from 1979 to 2019. Positive trends were noticed for storms with criteria of 2—5 meters. One positive trend was found for storms > 2 meters high: storms become longer by 7 hours every 10 years. Significant positive trends for the number of storms (criterion 2—5 m) by season were observed in the periods October—December and January—March. The maximum magnitude of trends (for storms with a criterion of 2 meters — 3 storms / 10 years) is typical for the period January—March. There are two main areas of storm grouping – the border with the Barents Sea and to the east of the Kara Gate. Since 1994, there has been a noticeable increase in the number of storms in the Kara Sea north of 76 °N and east of the Kara Gate.

Keywords: storm activity, wind waves, WAVE WATCH III, Kara Sea, wave modeling.

Acknowledgments. The work of S. A. Myslenkov was supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental changes”. The work of E. E. Kruglova has been prepared within the theme FMWE-2021-0002 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Kruglova E. E., Myslenkov S. A. Analysis of storm activity in the Kara Sea according to the wave model WAVE WATCH III. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):675—690. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-675-690. (In Russ.).

Введение

Арктический регион особенно сильно подвержен значительным климатическим изменениям, в том числе сокращению площади морских льдов [1—2]. В связи с этим появляется большая свободная ото льда водная поверхность [3—4], влияющая на режим ветрового волнения Арктики, в том числе и Карского моря.

Актуальность работы заключается в том, что изучение изменений, происходящих в режиме ветрового волнения, крайне важно для морского транспорта, наиболее подверженному рискам, связанным с волнением на море. Изменение ветрового волнения влияет на движение судов по Северному морскому пути. Также ветровое волнение оказывает влияние на морскую прибрежную инфраструктуру, на добычу полезных ископаемых, в том числе и на акватории Карского моря [5].

Карское море расположено преимущественно на шельфе, с преобладающими глубинами 50—100 м, а наибольшая глубина моря — 620 м [6]. С октября по июнь море покрыто льдами. Таяние льдов начинается с конца мая — начала июня и происходит вначале в устьях рек, а затем в открытой части моря [7]. В осенне-зимний период наблюдается увеличение средних значений скорости ветра до 8 м/с, что связано с увеличением количества циклонов. Летом скорость ветра падает до 5 м/с [6]. В работах [8—9] изучается изменение циклонической активности в Арктике, а в [10] описываются результаты реанализа и прогноза волн в Карском море с использованием ветра WRF.

Последнее десятилетие характеризуется значительным потеплением климата, сокращением площади многолетнего и сезонного льда в Арктике [3, 4] и появлением значительно большей, свободной ото льда поверхности моря. В работе [11] В. П. Карклиным и И. Д. Карелиным были приведены результаты многолетних наблюдений за припайными полыньями арктических морей, в том числе Карского моря, за период 1980—2009 гг. В работе [12] исследовалась общая тенденция к увеличению границ стационарных полыньей, а также присутствие слитых полыньей и уменьшение площади припайного льда, что говорит о процессах динамики ледообразования, наблюдающихся в Карском море в 2009—2019 гг. В обзорной статье [13] представлены свидетельства из различных опубликованных источников, позволяющих заключить, что именно изменения характеристик ледового покрова в значительной степени способствовали изменениям в океане и полярной атмосфере.

В статье [14] выявлены отрицательные тренды в ледовитости Карского моря в период с 1982 по 2015 г. Также отрицательные тренды площади распространения морского льда в период с 1979 по 2017 г. отмечаются в работе [15]. В летние месяцы и ранней осенью с 2000 по 2019 г. тренды сокращения льда возрастают по сравнению с 1979—1999 гг. [3]. По прогностическим оценкам, очищение Баренцева и Карского морей в сентябре от морского льда может произойти в 2026 г. [16].

Ранее ветровое волнение в арктических морях рассматривалось в работах [17—22]. Также сведения о режиме ветрового волнения Карского моря представлены в статьях [7, 23—26]. Однако многолетние тренды штормовой активности не изучались. Данная работа является продолжением работ [23, 26] с анализом сезонной изменчивости штормовой активности и продолжительности штормовых событий.

Цель данной работы состоит в оценивании межгодовой и сезонной изменчивости штормовой активности и продолжительности штормов в Карском море на основе данных спектральной волновой модели WAVEWATCHIII с 1979 г. по 2019 г., и выявлении особенностей пространственного распределения штормов.

Данные и методы

Для анализа ветрового волнения использовалась база данных, полученная на основе данных моделирования из работы [23]. При создании этой базы использовалась волновая модель WAVEWATCHIII 6.07 и схема генерации волн ST6 [27]. Расчеты проводились с использованием неструктурной сетки, состоящей из 37729 узлов. Сетка охватывает Баренцево и Карское моря, а также всю северную часть Атлантического океана. Пространственное разрешение варьируется от ~ 700 м для прибрежной зоны Карского моря, до ~ 20 км в открытой части Карского моря. Для дальнейшего анализа штормовой активности из общей сетки были выбраны узлы, находящиеся строго в пределах Карского моря. Границы Карского моря взяты из [6, 28]. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 ч из реанализа NCEP/CFSR (1979—2010) с пространственным разрешением $\sim 0,3^\circ$ и реанализа NCEP/CFSv2 (2011—2019) с разрешением $\sim 0,2^\circ$.

Информация об оценках качества волновой модели на основе прямых и спутниковых измерений (Cryosat, Saral и Sentinel) представлена в [20, 23, 26]. При сопоставлении модельных данных со спутниками получено, что коэффициент корреляции составляет $\sim 0,9$, среднеквадратическое отклонение меняется от 0,32 до 0,39 м. В нашей работе выполнены дополнительные оценки качества результатов моделирования на основе данных измерений в Обской губе (71° с.ш., $73,56^\circ$ в.д.), выполненных в 2015—2017 гг. и опубликованных в [24]. Результаты сравнения представлены на рис. 1. При сопоставлении данных измерений и результатов моделирования получены коэффициенты корреляции от 0,81 до 0,87, среднеквадратическое отклонение от 0,16 до 0,26 м, индекс рассеяния от 0,42 до 0,70.

Выходные данные модели представляют собой характеристики ветрового волнения с дискретностью 3 ч с 1979 по 2019 г. Продолжительность модельных расчетов составила 41 год. В работе использовалась высота значительных волн (H_s).

Для анализа штормовой активности (далее — штормов) в Карском море использована методика Peak Over Threshold (POT). Применение данной методики

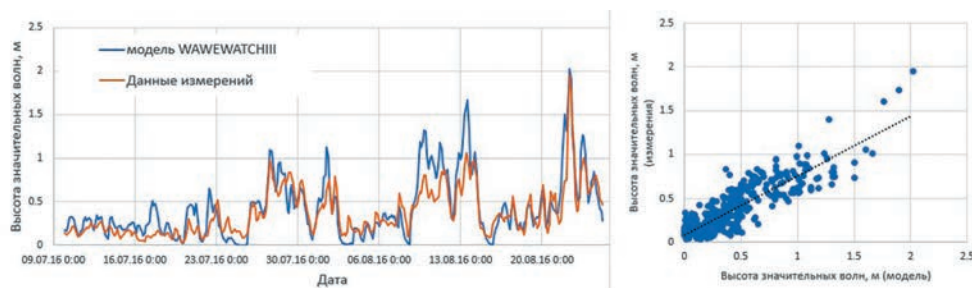


Рис. 1. Сопоставление результатов моделирования и данных измерений за период с 10.07.2016 по 25.08.2016 в Обской губе [24].

Fig. 1. Comparison of results modeling and measurement data for the 10.07.2016 — 25.08.2016 period [24].

можно встретить в работах [7, 8, 20, 25]. Методика расчета заключалась в следующем: задается критерий (в нашем случае выбраны критерии высоты волн от 2 до 6 м) и проводится подсчет количества переходов исследуемой величины через критерий. При превышении критерия событие (шторм) начинается, при обратном переходе через критерий (вниз) событие заканчивается. Продолжительность шторма вычисляется как разность между временем конца и начала события. Подсчет штормов производится для всей акватории Карского моря. Если время между двумя штормами составляло менее 9 ч (3 срока), то считалось, что это один большой шторм. Как только время между ними превышало 9 часов — шторма считались как два отдельных.

Полученные данные о количестве штормов в год на основе многолетней и сезонной многолетней выборки были исследованы на наличие трендов. В качестве трендов выступала модель линейной регрессии ($y = a_1x + a_0$). Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности. Для оценки трендов на значимость проводился анализ на адекватность моделей регрессии по критерию Фишера, проверка коэффициентов регрессии на значимость и проверка коэффициента детерминации на значимость. Для оценки адекватности проверялась гипотеза о равенстве дисперсий $H_0 : D_y = D_e$ и альтернативная $H_1 : D_y \neq D_e$. Здесь D_y — дисперсия модели, характеризующая изменчивость линии регрессии относительно среднего значения модели; D_e — дисперсия остатков, характеризующая отклонение уравнения регрессии от фактических значений. Для оценки использовался рассчитанный критерий Фишера, который сравнивался с критическим значением критерия Фишера при заданном уровне значимости 5 %. Если эмпирическое значение критерия Фишера больше критического, гипотеза о равенстве дисперсий отвергалась, что означает в рассматриваемом случае адекватность регрессионной модели или, другими словами, значимость линейного тренда. Для проверки коэффициентов регрессии на значимость была выдвинута гипотеза $H_0 : a_i = 0; b = 0$ при $H_1 : a_i \neq 0; b \neq 0$. Для проверки рассчитываются критерии Стьюдента. Для проверки коэффициента детерминации на значимость выполнялась проверка нулевой гипотезы $H_0 : r = 0$ и альтернативной ей. Проверка выполнялась также по критерию Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Сезонная изменчивость высоты значительных волн

На основе данных моделирования были получены средние и максимальные многолетние значения высоты значительных волн для стандартных календарных сезонов: зима (декабрь—февраль), весна (март—май), лето (июнь—август), осень (сентябрь—ноябрь). Когда Карское море замерзает, характеристики волнения равны 0. При осреднении эти характеристики учитываются как 0.

На рис. 2 а видно, что максимальные высоты значительных волн зимой наблюдаются севернее Новой земли и достигают ~11 м на границе с Баренцевым морем. Для зимы средняя многолетняя высота значительных волн составляет < 0,5 м (рис. 2 б).

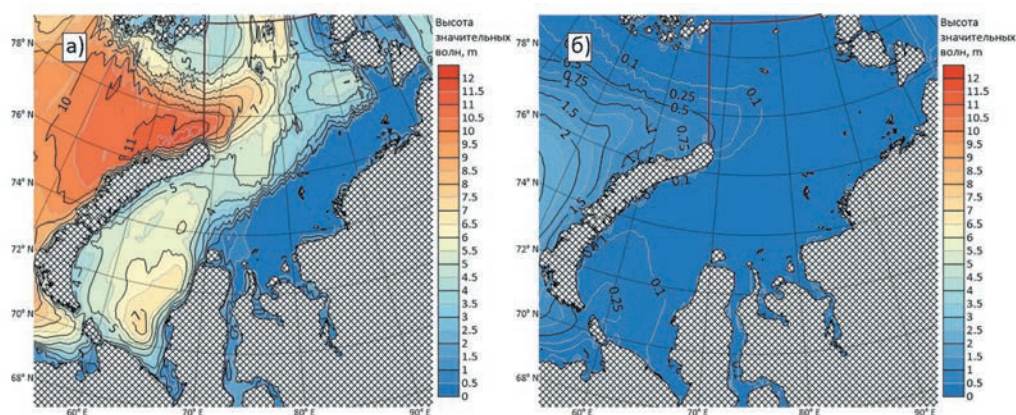


Рис. 2. Максимальная (а) и средняя (б) многолетняя высота значительных волн зимой за период с 1979 по 2019 гг.

Fig. 2. Maximum (a) and average (b) long-term of significant wave height in winter for the 1979—2019 period.

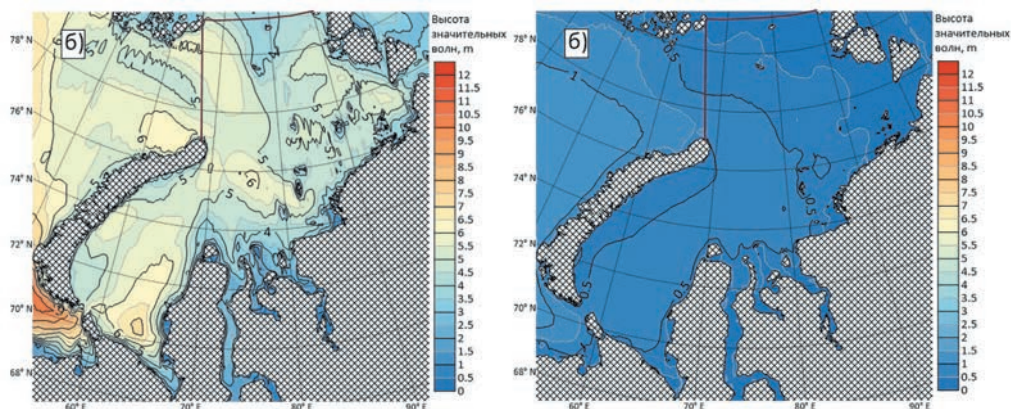


Рис. 3. Максимальная (а) и средняя (б) многолетняя высота значительных волн летом за период с 1979 по 2019 гг.

Fig. 3. Maximum (a) and average (b) long-term of significant wave height in summer for the 1979—2019 period.

Для весны средняя высота на всей акватории Карского моря $< 0,5$ м. Максимальная высота волн наблюдается также на границе с Баренцевым морем и не превышает 5,5 м. Наблюдаются локальные максимумы южнее Новой земли, их высота не превышает 4,5 м.

Летом средняя высота волн достигает 0,6—0,7 м в центральной части моря, на границе с Баренцевым морем и в проливе Карские ворота (рис. 3 б). Максимум

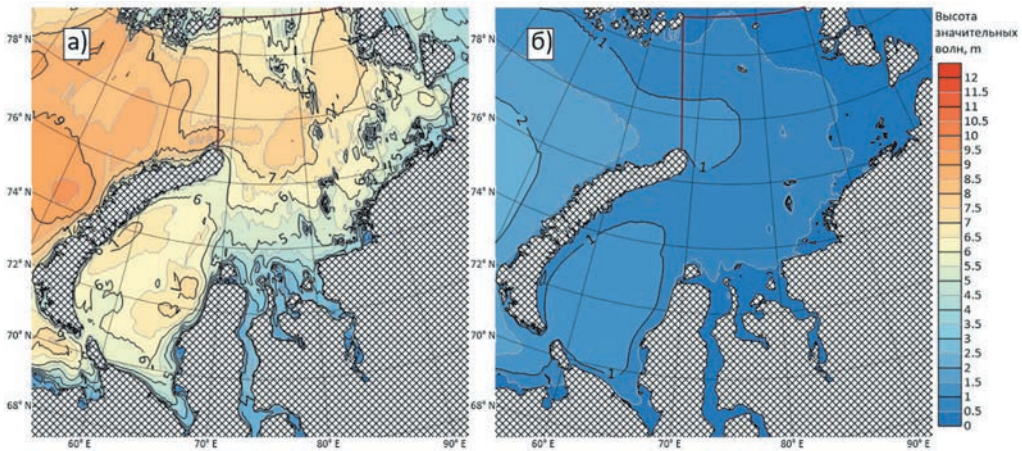


Рис. 4. Максимальная (а) и средняя (б) многолетняя высота значительных волн осенью за период с 1979 по 2019 г.

Fig. 4. Maximum (a) and average (b) long-term of significant wave height in autumn for the 1979—2019 period.

наблюдается около Байдарацкой губы и составляет ~ 7 м (рис. 3 а). Еще один локальный максимум приходится на центральную часть Карского моря, но он не превышает 6,5 м.

На рис. 4 б видно, что для осени характерно повышение средней высоты значительных волн до 1,2 м севернее Новой Земли и восточнее Карских ворот. На большей части Карского моря средняя высота волн $> 0,5$ м. Максимумы (рис. 4 а) наблюдаются в районе Байдарацкой губы и в северной части Карского моря (высота волны > 7 м). Расположение максимумов высоты значительных волн в осенний период похоже на расположение максимумов в летний сезон. Это объясняется тем, что из-за муссонного характера ветрового режима в Карском море в первой части осени заметно увеличивается повторяемость ветров, характерных для летних условий [6].

Межгодовая и сезонная изменчивость штормовой активности

По методике ROT [29] был выполнен анализ количества случаев штормового волнения в год с высотами значительных волн от 2 до 6 м (рис. 5 а). Среднее многолетнее количество штормов высотой > 2 м равно 45, а высотой > 3 м — 30. Максимальное количество штормов с высотой > 2 м наблюдалось в 1995 г. (65 штормов), а с высотой > 3 м — приходится на 2016 г. (62 штормов) и 2018 г. (64 шторма). В 2016 г. также наблюдался абсолютный максимум штормов с высотой волны более 4 м (34 шторма), а в 2018 г. абсолютный максимум для штормов с высотой значительных волн более 5 м составлял 13 штормов. Найдены значимые положительные тренды для штормов с критерием 2—5 м. Максимальная величина тренда

наблюдается у штормов с критерием 3 м — 0,65 шторм/год, т. е. каждые десять лет количество штормов с высотой значительных волн более 3 метров увеличивается на 7 (на 20 %). Увеличение числа штормов во времени связано с уменьшением площади морского льда [1, 3—5].

При анализе была также оценена средняя продолжительность шторма с разными критериями для каждого года. На рис. 5 б видно, что самые многочисленные шторма с высотами > 2 м являются так же самыми продолжительными. Средняя продолжительность такого шторма за весь период составляет ~55 ч или 2,3 сут, максимальная средняя — 80 ч или ~3,3 сут в 2016 г. Тренд положительный,

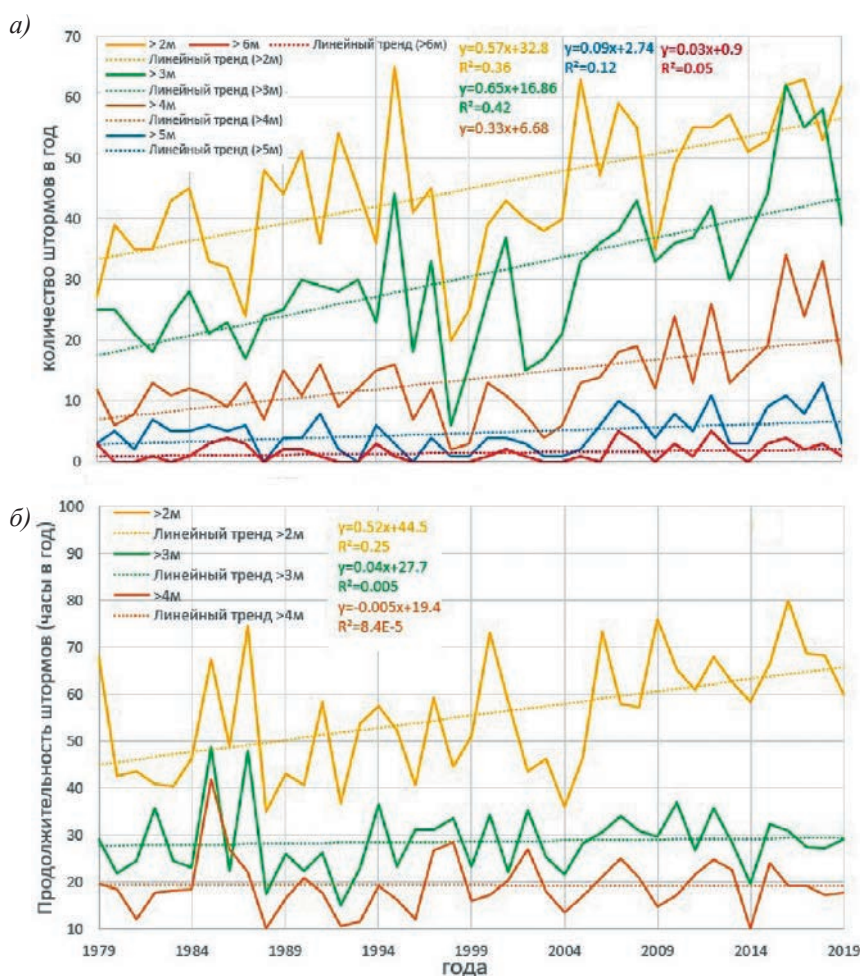


Рис. 5. Изменение количества штормов в год (а), средняя продолжительность шторма в год (б).

Fig. 5. Changes in the number of storms per year (a), the average duration of a storm per year (b).

значимый — каждые 10 лет шторма с высотой значительных волн более 2 м становятся продолжительнее на 5 ч. Тренды для продолжительности штормов остальных критериев оказались незначимыми.

Были выполнены оценки значимости трендов по сезонам года, которые разделялись формально на периоды январь—март, апрель—июнь, июль—сентябрь, октябрь—декабрь. Черным пунктиром на графиках отмечены средние за периоды площади свободной ото льда поверхности в долях от площади Карского моря.

На рис. 6 *а* видно, что в январе—марте количество штормов с высотой значительных волн от 2 до 4 м увеличивается. Положительные тренды являются значимыми. Максимальная величина тренда для периода январь—март наблюдается у штормов с критерием 2 м — количество штормов растет почти на 3 шторма каждые 10 лет. В январе—марте наблюдается наибольшая корреляция между долей свободной ото льда поверхности моря и количеством штормов — 0,85 (для штормов с высотой волны > 4 м). На рис. 6 *б* видно, что не каждый год в апреле—июне бывают шторма высотой более 3 м. Тренды положительны и значимы для всех штормов с высотой волн 2—4 м. Для июля—сентября характерно большее по численности количество случаев штормовой активности, однако величины трендов невелики (не более 1 шторма каждые 10 лет). Значимым является только положительный тренд для штормов с высотой волн > 3 м. Для этого же периода характерен самый большой положительный тренд площади свободной ото льда поверхности Карского моря. В октябре—декабре (рис. 6 *з*) наблюдается максимальное количество штормов по сезонам с высотой волн 3 м, равное 29. Пик приходится на 2018 г. и наблюдается на других штормах (с высотой волн 4—5 м). Тренды положительны, значимы для штормов 3—5 м. Максимальная величина тренда приходится для штормов с высотами > 3 м — 2 шторма / 10 лет.

На рис. 7 представлены карты пространственного распределения максимальных значений высоты волн для каждого шторма высотой > 2, 3 и 4 м для восьми временных отрезков по пять лет (кроме последнего с периодом шесть лет). Проводился визуальный анализ районов скопления штормов. На всех картах наблюдается два четких района, в которых группируется большое количество штормов: граница Карского и Баренцева морей (севернее Новой Земли) и район восточнее Карских ворот. Первый район связан с распространением волн из акватории Баренцева моря. Второй район тоже связан с влиянием Баренцева моря, а также характеризуется более длительным безледным периодом. Прослеживается тенденция появления штормов в северной части Карского моря из-за уменьшения площади ледового покрова в последние годы. Начиная с 1994 г. заметно увеличение числа штормов севернее 76° с.ш. Отмечается также периодичность в численности штормов на границе с Баренцевым морем: если в 1994—1998 гг. штормов вдоль границы много (пик в 1994 г. — 67 штормов (рис. 2 *а*)), то в следующие пять лет их наблюдается меньше. В 2004—2008 гг. численность штормов в этом районе опять увеличивается. Также можно отметить наибольшее количество штормов высотой > 2 м в период 2014—2019 гг., соответствующим пику численности штормов зимой в 2017 г. и весной в 2016 г.

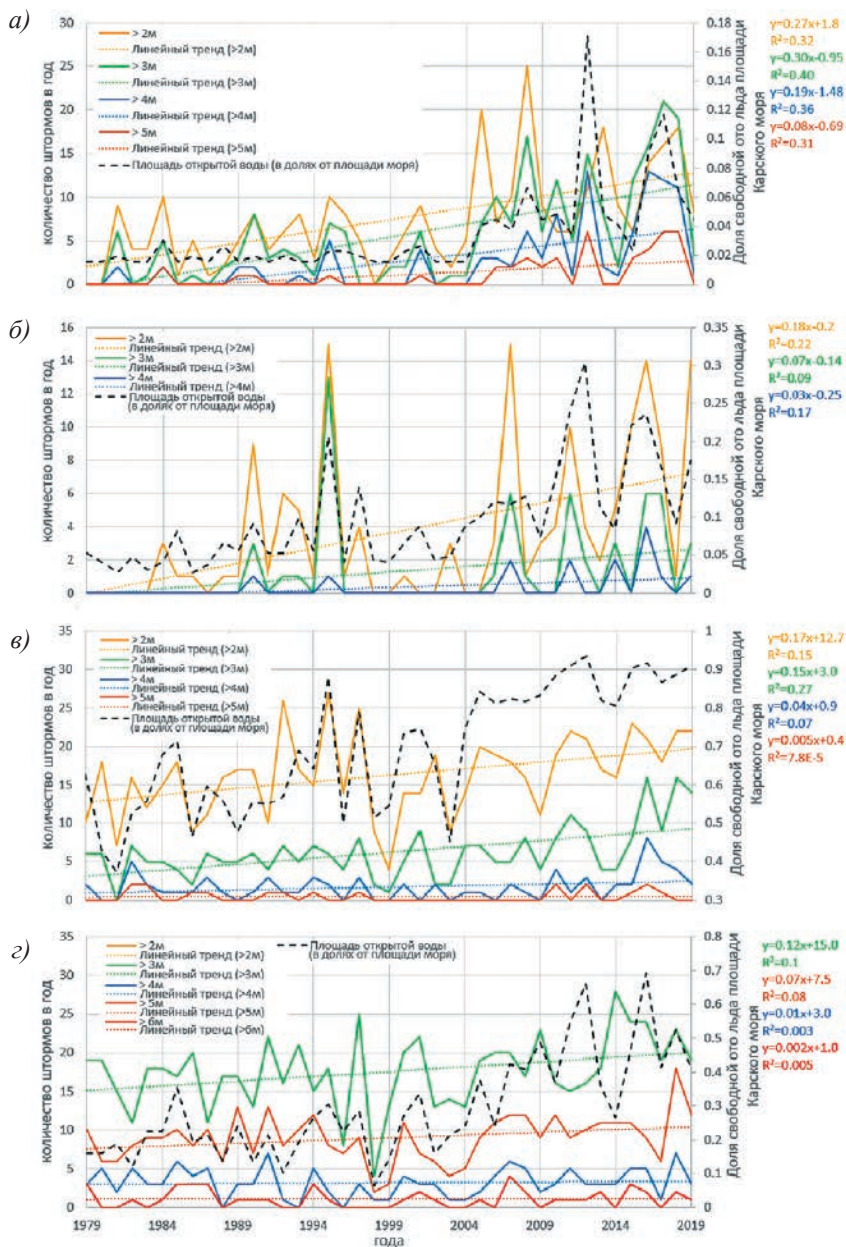


Рис. 6. Изменения количества штормов:

а) январь—март; б) апрель—июнь; в) июль—сентябрь; г) октябрь—декабрь.

Fig. 6. Changes in the number of storms:

а) January—March; б) April—June; в) July—September; г) October—December.

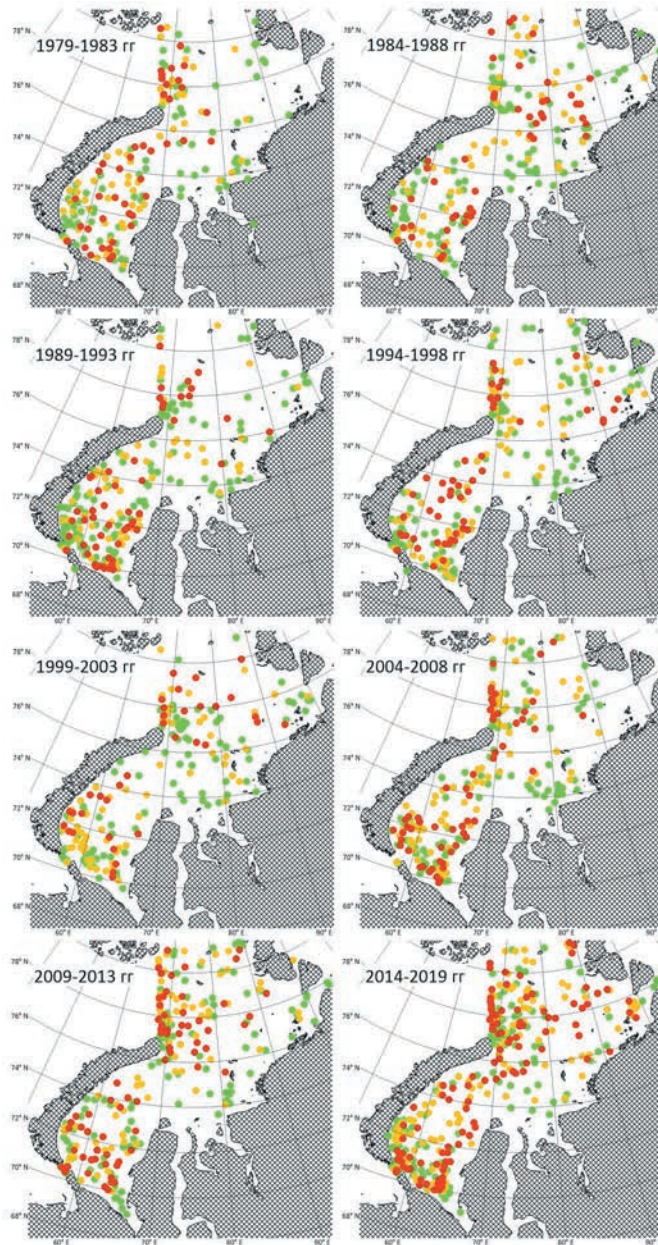


Рис. 7. Пространственная изменчивость расположения максимума штормов значительных волн высотой более 2 м (зеленые), 3 м (желтые), 4 м (красные) в период с 1979 по 2019 г.

Fig. 7. Spatial variability of the location of the maximum storms significant wave height of more than 2 m (green), 3 m (yellow), 4 m (red) in the period from 1979 to 2019.

При анализе рис. 5 видно, что с 2004 г. количество штормов на акватории Карского моря больше, чем в период с 1997 по 2003 г., что хорошо согласуется с оценками трендов ледовитости в работах [5, 12, 14].

Заключение

Максимальная межгодовая высота значительных волн $\sim 11,2$ м наблюдается в период декабрь—январь на границе Карского и Баренцева морей. Максимальные средние значения $\sim 1,3$ м характерны для того же района в период сентябрь—ноябрь.

За период с 1979 по 2019 г. количество штормов высотой > 2 м увеличилось более чем в 2 раза. Обнаружены положительные тренды для штормов с высотой 2—5 м. Тренд для штормов с высотой > 6 м не значим. Максимальная величина тренда наблюдается у штормов с высотами волн > 3 м — 7 штормов / 10 лет, т. е. количество штормов увеличивается на 20 % каждые 10 лет.

Найден один положительный тренд для продолжительности штормов высотой > 2 м: шторма становятся продолжительнее на 5 ч каждые 10 лет. Тренды для продолжительности штормов остальных критериев оказались незначимыми.

Значимые положительные тренды для количества штормов (высотой 2—5 м) по сезонам выявлены в периоды октябрь—декабрь и январь—март. Максимальная величина трендов (для штормов с высотами 2 м — 3 шторма / 10 лет) характерна для периода январь—март. Летом наблюдается только один значимый положительный тренд для штормов с критерием 3 м. Для периода январь—март характерно почти полное отсутствие штормов с высотой волн > 4 м до 2004 г., после чего они стали возникать в среднем 4 раза в год. Таким образом, максимальный вклад в межгодовую изменчивость количества штормов вносит период октябрь—март.

При совместном анализе количества штормов и доли свободной ото льда поверхности Карского моря выявлено, что наиболее сильные изменения в площади морского льда (ПМЛ) наблюдаются в период июль—декабрь. При учете слабых ветров в летнее время над Карским морем и увеличения циклонической активности в осенний сезон можно сделать вывод, что из-за наиболее активного сокращения ПМЛ в период октябрь—декабрь и наибольшей корреляции между количеством штормов и долей свободной поверхности моря в январе—марте, именно период октябрь—март вносит значительный вклад в изменения штормовой активности Карского моря.

При анализе пространственной изменчивости найдено два основных района группировки штормов: граница с Баренцевым морем и к востоку от Карских ворот. С 1994 г. заметно увеличение количества штормов Карского моря севернее 76° с.ш. и восточнее Карских ворот. Наибольшее количество штормов на акватории Карского моря характерно для 2014—2019 г.

Список источников

1. Семенов В. А., Мартин Т., Беренс Л. К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 77—107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.

2. Алексеев Г. В., Александров Е. И., Глок Н. И., Иванов Н. Е., Смоляницкий В. М., Харланенкова Н. Е., Юлин А. В. Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5—40. doi: 10.7868/S0205961415020025.
3. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. V. 373, № 2045. P. 20140159. doi: 10.1098/rsta.2014.0159.
4. Шалина Е. В. Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 328—336.
5. Гачаев А. А. Конструктивные особенности морских сооружений для условий юго-западной части Карского моря // World science: problems and innovations. 2021. С. 72—74.
6. Мокиевский В. О., Цетлин А. Б., Сергиенко Л. А. и др. Экологический Атлас. Карское море. М.: ООО «Арктический научный центр», 2016. 271 с.
7. Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Чернышева Е. С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей // Российский Морской регистр судоходства. СПб., 2009. 358 с.
8. Tilinina N., Gulev S. K., Bromwich D. H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41, № 5. P. 1766—1772.
9. Kislov A., Matveeva T. The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea // Atmospheric and Climate Sciences. 2020. V. 10, № 03. P. 339. doi: 10.4236/acs.2020.103019
10. Diansky N. A., Fomin V. V., Kabatchenko I. M., Gruzinov V. M. Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics // Arctic: ecology and economy. 2014. № 1(13). P. 57—73.
11. Карелин И. Д., Карклин В. П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 179 с.
12. Путьрский В. Е., Юлин А. В., Павлова Е. А., Кашкова В. С. Исследование динамики заприпайных полыньей Карского моря в зимний период // Природообустройство. 2021. № 4. С. 110—115. doi: 10.26897/1997-6011-2021-4-110-115.
13. 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
14. Старцева А. В., Старцев Л. А. К вопросу о сокращении ледовитости Карского моря // Метеорологический вестник. 2016. Т. 8, № 2. С. 43—69.
15. 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.
16. 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.
17. Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992—2014: seasonality and trends. Cryosphere. 2016. № 10(4). P. 1605—1629. doi:10.5194/tc-10-1605-2016.
18. Surkova G., Sokolova L., Chichev A. Long-term regime of extreme winds in the Barents and Kara seas // Vestnik Moskovskogo universiteta. 2015. Seriya 5: Geografija. 5. P. 53—58.
19. Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., Koltermann P. Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White Seas and their future climate projections // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11, № 1. P. 93—112. doi: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-93-112.
20. Мысленков С. А., Маркина М. Ю., Архипкин В. С., Тилинина Н. Д. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 2. С. 45—54.
21. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики. М.: Издательство «Нефтяное хозяйство», 2015. 128 с.
22. Чешм С. В., Кудрявцев В. Н., Юровская М. В. Параметрическая модель поверхностных волн в приложении к Арктическим морям // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 515—530. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530.

23. Мысленков С. А., Платонов В. С., Сильвестрова К. П., Добролюбов С. А. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498, № 2. С. 175—182. doi: 10.31857/S2686739721060128.
24. Коробов П. В., Алексеев В. В., Дымов В. И., Яковлева Н. П., Смирнов К. Г. Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по данным инструментальных измерений в 2015—2017 годах // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2. С. 79—89. doi: 10.37162/2618-9631-2020-2-79-89.
25. Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea // Reg. Stud. Mar. Sci. 2019. Article 100719.
26. Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia. Water — 2021. Vol. 13, № 648. doi: 10.3390/w13050648.
27. Tolman H. (2019) The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, available.
28. International Hydrographic Organization: [Электронный ресурс]: IHO PUBLICATION S-23 Limits of Oceans and Seas. Draft 4th Edition, 1986. URL: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/S-23WG/S-23WG_Misc/Draft_1986/Draft_1986.htm (дата обращения: 09.11.2021).
29. Lopatoukhin L., Rozhkov V., Ryabinin V., Swail V., Boukhanovsky A., Degtyarev A. Estimation of Extreme Wind Wave Heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041; WMO & IOC; Geneva; 2000.

References

1. Semenov V. A., Martin T., Berens L. K., Latifa M., Astafyeva E. S. Changes in the area of Arctic sea ice in the ensembles of climate models CMIP3 and CMIP5. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2017;57(1):77—107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107. (In Russ.).
2. Alekseev G. V., Alexandrov E. I., Glock N. I., Ivanov N. E., Smolianitskii V. M., Kharlanenkova N. E., Iulin A. V. Evolution of the area of the Arctic sea ice cover in the conditions of modern climate change. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Exploration from space*. 2015;(2):5—40. doi: 10.7868/S0205961415020025. (In Russ.).
3. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2045):20140159.
4. Shalina E. V. Reduction of the Arctic ice cover according to satellite passive microwave sensing. *Sovremennye problemy izucheniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of studying the Earth from space*. 2013;10(1):328—336. (In Russ.).
5. Gachaev A. A. Design features of marine structures for the conditions of the south-western part of the Kara Sea. *World science: problems and innovations*. 2021:72—74. (In Russ.).
6. Mokievsky V. O., Tsetlin A. B., Sergienko L. A. et al. *Ekologicheskij Atlas. Karskoe more = Ecological Atlas. The Kara Sea*. Moscow: OOO “Arkticheskij nauchnyj centr”, 2016: 271 p. (In Russ.).
7. Lopatukhin L. I., Bukhanovsky A. V., Chernysheva E. S. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Yaponskogo i Karskogo morej. *Rossiiskii Morskoi registr sudokhodstva = Russian Maritime Register of Shipping*. Saint-Petersburg, 2009: 358 p. (In Russ.).
8. Tilinina N., Gulev S. K., Bromwich D. H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis. *Geophysical Research Letters*. 2014;41(5):1766—1772.
9. Kislov A., Matveeva T. The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2020;(10):339—356. doi: 10.4236/acs.2020.103019.
10. Diansky N. A., Fomin V. V., Kabatchenko I. M., Gruzinov V. M. Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics. *Arctic: ecology and economy*. 2014;1(13):57—73.
11. Karelin I. D., Karklin V. P. *Pripai i zapripainye polyn'i arkticheskikh morei sibirskogo shel'fa v kontse XX — nachale XXI veka = Pripay and zapripayny polynyas of the Arctic seas of the Siberian shelf at the end of the XX – beginning of the XXI century*. St. Petersburg: AANII, 2012: 179 p. (In Russ.).

12. Putyrsky V. E., Iulin A. V., Pavlova E. A., Kashkova V. S.. Study of the dynamics of the sagebrush of the Kara Sea in winter. *Prirodoobustrojstvo = Environmental management*. 2021;(4):110—115. doi: 10.26897/1997-6011-2021-4-110-115. (In Russ.).
13. Ivanov V. V. Modern changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with the reduction of the sea ice cover. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(64):407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434. (In Russ.).
14. Startseva A. V., Startsev L. A. On the issue of reducing the ice cover of the Kara Sea. *Meteorologicheskij vestnik = Meteorological Bulletin*. 2016;8(2):43—69. (In Russ.).
15. Malinin V. N., Vainovsky P. A. To compare the characteristics of the interannual variability of the sea ice area of the Northern and Southern hemispheres. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019;(57):77—90. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-77-90. (In Russ.).
16. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the ice-free regime of the Arctic regions come? *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019;(56):98—109. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-98-109. (In Russ.).
17. Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992—2014: seasonality and trends. *Cryosphere*. 2016;10(4):1605—1629. doi: 10.5194/tc-10-1605-2016.
18. Surkova G., Sokolova L., Chichev A. Long-term regime of extreme winds in the Barents and Kara seas. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of the Moscow University*. 2015;(5):53—58.
19. Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., Koltermann P. Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White Seas and their future climate projections. *Geography, Environment, Sustainability*. 2018;11(1):93—112. doi: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-93-112.
20. Myslenkov S. A., Markina M. Yu., Arkhipkin V. S., Tilinina N. D. The frequency of storm surge in the Barents Sea in the conditions of modern climate. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of the Moscow University*. 2019;(2):45—54. (In Russ.).
21. *Atlas gidrometeorologicheskikh i ledovykh uslovij morej rossijskoj Arktiki = Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic*. Moscow: Izdatel'stvo «Neftyanoe hozyajstvo», 2015: 128 p. (In Russ.).
22. Cheshm S. V., Kudryavtsev V. N., Yurovskaya M. V. Parametric model of surface waves in application to the Arctic seas. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(64):515—530. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530. (In Russ.).
23. Myslenkov S. A., Platonov V. S., Sil'vestrova K. P., Dobrolyubov S. A. Growth of storm activity in the Kara Sea from 1979 to 2019 according to modeling data. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth sciences*. 2021;498(2):175—182. doi: 10.31857/S2686739721060128. (In Russ.).
24. Korobov P. V., Alekseev V. V., Dymov V. I., Iakovleva N. P., Smirnov K. G. Verification of model calculations of waves in the water area of the Gulf of Ob according to instrumental measurements in 2015—2017. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological studies and forecasts*. 2020;(2):79—89. doi: 10.37162/2618-9631-2020-2-79-89. (In Russ.).
25. Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea. *Reg. Stud. Mar. Sci*. 2019. Article 100719.
26. Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia. *Water*. 2021;13(648). doi: 10.3390/w13050648.
27. Tolman H. (2019) The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, available.
28. International Hydrographic Organization: [Electronic resource]: IHO PUBLICATION S-23 Limits of Oceans and Seas. Draft 4th Edition, 1986. Available at: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/S-23WG/S-23WG_Misc/Draft_1986/Draft_1986.htm (accessed: 09.11.2021).
29. Lopatoukhin L., Rozhkov V., Ryabinin V., Swail V., Boukhanovsky A., Degtyarev A. Estimation of Extreme Wind Wave Heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041; WMO & IOC; Geneva; 2000.

Информация об авторах

Елизавета Евгеньевна Круглова, студентка 4 курса бакалавриата Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета (до 06.2022 г.) и студентка 1 курса магистратуры кафедры океанологии географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (с 09.2022 г.), lissavetaandin@gmail.com.

Станислав Александрович Мысленков, канд. физ-мат. наук, старший научный сотрудник Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова на кафедре океанологии географического факультета

Information about the authors

Elizaveta E. Kruglova, 4th year undergraduate student of the Institute of Hydrology and Oceanology of the Russian State Hydrometeorological University (until 06.2022) and 1st year graduate student of the Department of Oceanology of the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University (since 09.2022), lissavetaandin@gmail.com.

Stanislav A. Myslenkov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher at Lomonosov Moscow State University at the Department of Oceanology of the Geographical Faculty.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 06.05.2022

Принята к публикации после доработки 19.09.2022

The article was received on 06.05.2022

The article was accepted after revision on 19.09.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 691—711.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):691—711.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.46.09:504.42.054](268.252)(268.45)«2019»

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711

Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г.

*А. А. Ершова¹, Т. Р. Ерёмина¹,
И. Н. Макеева¹, Д. В. Панькин², Ю. А. Татаренко¹,
А. В. Березина³, А. С. Кузьмина¹*

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

² Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)

³ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Аннотация. Исследование характеристик микропластиковых частиц в «подповерхностном» слое (4,5 м) Баренцева и Карского морей в 2019 г. по данным измерений в рамках программы ТРАНСАРКТИКА-2019 показало, что максимальное содержание антропогенных частиц, в том числе микропластика, характерно для Баренцева моря — до 28 шт/м³. Подтверждена барьерная роль архипелага Новая Земля в распространении частиц далее на северо-восток; минимальные концентрации зафиксированы в Карском море (1 шт/м³), с повышением значений до 4 шт/м³ в районе плюмов сибирских рек. Преобладают микроволокна (более 50 %), а также частицы с идентифицированными пигментами — размером более 500 мкм. Метод спектрометрии комбинационного рассеяния позволил идентифицировать все виды микроволокон и частиц антропогенного происхождения. Показана преобладающая роль местных источников загрязнения в формировании «шестого» мусорного пятна в Западной Арктике — жидкие и твердые отходы с рыболовецких и грузовых судов.

Ключевые слова: микропластик, морской мусор, Баренцево море, Карское море, Северный морской путь, загрязнение, «шестое» мусорное пятно.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009, тема «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий». Съемка спектров комбинационного рассеяния света была произведена в ресурсном центре «Оптические и лазерные методы анализа состава вещества» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Для цитирования: Ершова А. А., Ерёмина Т. Р., Макеева И. Н., Панькин Д. В., Татаренко Ю. А., Березина А. В., Кузьмина А. С. Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г. // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 691—711. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711.

© Ершова А. А., Ерёмина Т. Р., Макеева И. Н., Панькин Д. В., Татаренко Ю. А., Березина А. В., Кузьмина А. С., 2022

Original article

Microplastic contamination of marine environment of the Barents and Kara seas in 2019

**A. A. Ershova¹, T. R. Eremina¹, I. N. Makeeva¹, D. V. Pankin²,
Yu. A. Tatarenko¹, A. V. Berezina³, A. S. Kuzmina¹**

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia, ershova@rshu.ru

² St. Petersburg State University (SPbSU)

³ P. P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences

Summary: The content, morphological and chemical characteristics of microplastic particles in the “sub-surface” layer (4,5 m) of the Barents and Kara Seas in 2019 were studied according to field measurements within the framework of the TRANSARCTICA-2019 cruise. The maximum content of anthropogenic microparticles is typical for the Barents Sea, especially for its southern part — up to 28 items/m³, the barrier role of the Novaya Zemlya archipelago in the distribution of particles further to the northeast has been confirmed. The minimum concentrations were recorded in the Kara Sea (1 items/m³), while increased concentrations (up to 4 items/m³) were observed in the plume area of Siberian rivers. The composition of samples is dominated by microfibrils (more than 50 %), as well as particles with identified pigments. The most numerous are particles larger than 500 microns. The use of the Raman spectrometry method made it possible to identify not only fragments, but also a significant amount of pigments inherent in particles of anthropogenic origin, thus, in all types of microfibrils and anthropogenic particles were taken into account in the microplastics analysis. The most likely sources of plastic waste and microplastics entering the central and northern part of the Barents Sea and the reason for the formation of the so-called “sixth” garbage patch in the Western Arctic is various types of shipping activities (liquid and solid waste from fishing and cargo vessels) in the southern part of the Barents Sea, as well as the neighboring Norwegian Sea, and not the long-range transport of particles from remote densely populated regions of Europe in the North Atlantic, as previously thought.

Keywords: microplastics, marine litter, Barents Sea, Kara Sea, Northern Sea Route, pollution, “sixth” garbage patch.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSZU-2020-0009, topic “Research of physical, chemical and biological processes in the atmosphere and hydrosphere under conditions of climate change and anthropogenic impacts”. The Raman spectra were recorded at the Optical and Laser Methods for Analyzing the Composition of Matter Resource Center of the Science Park of St. Petersburg State University.

For citation: Ershova A. A., Eremina T. R., Makeeva I. N., Pankin D. V., Tatarenko Yu. A., Berezina A. V., Kuzmina A. S. Microplastic contamination of marine environment of the Barents and Kara seas in 2019. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):691—711. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711. (In Russ.).

Введение

Загрязнение гидросферы пластиковым мусором и формирование «мусорных пятен» в океане стали одной из главных экологических проблем XXI века в связи с экспоненциальным ростом производства синтетических полимеров, используемых во всех отраслях промышленности [1]. Факторами попадания полимерных

отходов в моря и океаны являются судоходство и рыболовство, а также неправильное обращение с отходами на суше, что приводит к выносу реками значительного количества пластиковых отходов в океан. Пластиковые предметы и сети представляют значительную угрозу для морских организмов, а на морских открытых побережьях под воздействием УФ-излучения они быстро разрушаются и превращаются в микропластик (частицы менее 5 мм), который благодаря своим морфологическим и физико-химическим особенностям является потенциально высокоопасным токсикантом для живых организмов при попадании в пищевые цепи [2—4]. Ученые еще исследуют вопрос негативного влияния микропластика на здоровье человека, однако, уже достоверно установлено, что частицы микропластика попадают и в легкие, и в кровь человека, и даже в плаценту [5—8].

Исследования полярных регионов показали, что морская вода и побережья Арктики, несмотря на их значительную удаленность от густонаселенных районов планеты, в целом значительно загрязнены пластиковыми отходами и микропластиком [9], а Баренцево море названо местом формирования потенциального шестого мусорного пятна в Мировом океане [10]. Пластиковые отходы рыболовной отрасли (сети, ящики и др.) и бытовой мусор стали основным компонентом морского мусора в разные годы на побережьях архипелагов Баренцева моря (Новая Земля и Земля Франца Иосифа) [11—13]. Значительное количество плавающего пластикового мусора встречается на поверхности Баренцева моря в районах высокой транспортной нагрузки [13, 14], в частности была отмечена высокая вероятность нелегального сброса пластикового мусора с судов.

Значительное внимание исследователей в регионе Российской Арктики в последние годы уделяется частицам микропластика, в первую очередь в поверхностном и «подповерхностном» слое моря (0—5 м): в ходе нескольких арктических экспедиций установлен количественный и качественный состав микропластика, выявлены некоторые особенности его распространения, показана общая неравномерность в уровне загрязнения арктических морей [15—19]. Эти первые исследования показывают актуальность более детального исследования экосистемы Баренцева моря, где в целом отмечается значительно более высокое содержание микропластика в воде, чем в остальных районах Северного Ледовитого океана [15, 20].

Исследование загрязнения микропластиком граничащего с Баренцевым Карского моря также представляет большой интерес. Наблюдаемое в последние годы значительное увеличение морских перевозок по Северному морскому пути (СМП) становится причиной повышенной антропогенной нагрузки в этом регионе: объем грузоперевозок с 2011 по 2019 г. увеличился на 913 % [21], общее количество рейсов грузовых судов за 2019 г. составило 2694. В 2020—2021 гг. продолжалось увеличение грузоперевозок по СМП.

Вместе с тем, данные о содержании микропластика в водах Карского моря крайне скудны, а сведения об источниках поступления — противоречивы. В работе [16] на основе данных 2019 г. выявлено, что основными источниками загрязнения Карского моря являются атлантические воды и сибирские реки, причем влияние первых наиболее значительно. Показано наибольшее разнообразие

микроволокон в пределах речных плумов в Карском море, а микропластиковые частицы категории «фрагменты» характерны только для соленых морских вод. Также в работе [14] сделан вывод об отсутствии влияния речных плумов сибирских рек, как источников пластикового мусора в Карском море, что, по предположениям авторов, связано с осенним периодом наблюдений (маловодный период).

Целью данного исследования является анализ уровня загрязнения Баренцева и Карского морей микропластиком в 2019 г. по данным натурных измерений в рамках экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019, определение морфологических и физико-химических характеристик частиц микропластика и исследование пространственной картины их распространения.

Материалы и методы исследования

Основой настоящего исследования стали полевые данные, собранные авторами в рамках 4-го этапа экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 (на НИС «Профессор Мультиановский») в летне-осенний период 2019 г. В ходе экспедиции в течение двух этапов (Владивосток—Мурманск и Мурманск—Владивосток) всего было отобрано 120 проб морской воды из подповерхностного горизонта (4,5 м) для определения содержания микропластика на всем протяжении СМП (рис. 1), первичный и выборочный анализ которых представлен в [17]. В настоящем исследовании проведен полный анализ всех образцов, отобранных в морях Западной Арктики — в Карском и Баренцевом морях в 2019 г.

Отбор проб воды для определения содержания микропластиковых частиц проводился с помощью разработанного коллективом авторов пробоотборника HydroPuMP. Он встроен в проточную систему судна и подробно описан в работах [17, 22]: морская вода фильтруется через металлический фильтр размером 100 мкм, объем профильтрованной морской воды — в среднем 1500 л на пробу. Лабораторный анализ проб проводился согласно принятым в международной практике подходам к обработке проб [23—25] в условиях «чистой лаборатории» (clean lab) — в лаборатории ПластикЛаб (РГГМУ), с обязательным контролем загрязнения на каждом этапе пробообработки и анализа. Он включал следующие этапы: мокрое просеивание, термохимическая обработка (реактив Фентона и др.) для растворения органического вещества (рис. 2), фильтрация и высушивание (этапы подробно описаны в [17]). С помощью стереомикроскопа Bresser (увеличение 40х) осуществлялась первичная визуальная идентификация, подсчет и категоризация микрочастиц (определение формы, размеров, цвета и типа частицы), а также отбор потенциальных частиц для полимерного анализа.

Исследование химического состава микрочастиц было проведено неразрушающим и бесконтактным оптическим методом — методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), Raman spectroscopy (англ.). Съемка спектров осуществлялась в геометрии обратного рассеяния (рассеяние назад) на спектрометре КРС Senterra (Bruker) в ресурсном центре «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Для возбуждения комбинационного рассеяния использовался

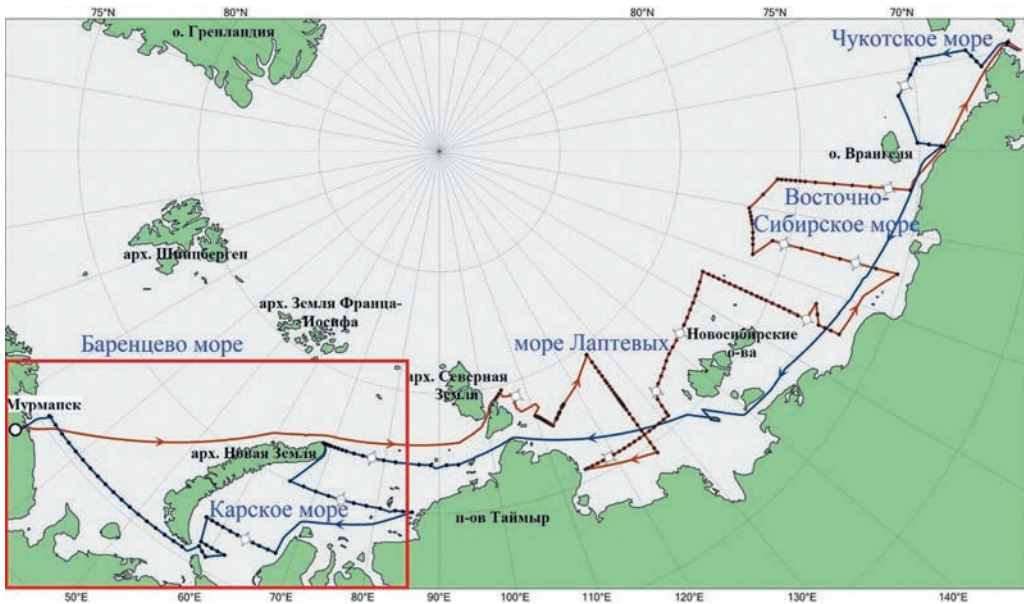


Рис. 1. Маршрут экспедиции в Северном Ледовитом океане в рамках 4-го этапа программы «ТРАНСАРКТИКА-2019» на НИС «Профессор Мультановский» в июле—октябре 2019 г.

Синий — путь из Владивостока в Мурманск 25.07.2019 г. — 07.09.2019 г.;
красный — путь из Мурманска в Владивосток — 08.09.2019 г. — 23.10.2019 г.
Выделенный красным — район настоящего исследования.

Fig. 1. The route of the expedition in the Arctic Ocean as part of the 4th stage of the TRANSARCTICA-2019 program on the R/V Professor Multanovsky in July—October 2019.

Blue — the route from Vladivostok to Murmansk 25.07.2019 — 07.09.2019 the route from Murmansk to Vladivostok — 08.09.2019 — 23.10.2019. The area of this study highlighted in red.

твердотельный лазер с длиной волны 785 нм. Фактическая мощность под 50х объективом с числовой апертурой 0,75 составляла от 0,06 до 1 мВт и для каждого образца подбиралась индивидуально в целях избежания возможной деструкции образца. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев использование данного лазера, с длиной волны, принадлежащей ближнему ИК диапазону, позволяло существенно уменьшить люминесценцию в области полезного КРС сигнала по сравнению с использованием лазеров, с длиной волны, принадлежащей видимому диапазону. Время накопления составляло от 100 до 200 с, число повторов — 2. Для минимизации люминесценции от предметного стекла использовался конфокальный режим съемки с диаметром ирисовой конфокальной апертуры 50 мкм. Дополнительно для большей наглядности и возможности сравнения со спектрами из баз данных осуществлялось кусочно-линейное вычитание базовой линии. Идентификация веществ осуществлялась путем сравнения частот пиков полученных спектров с пиками в спектрах КРС веществ из баз данных.

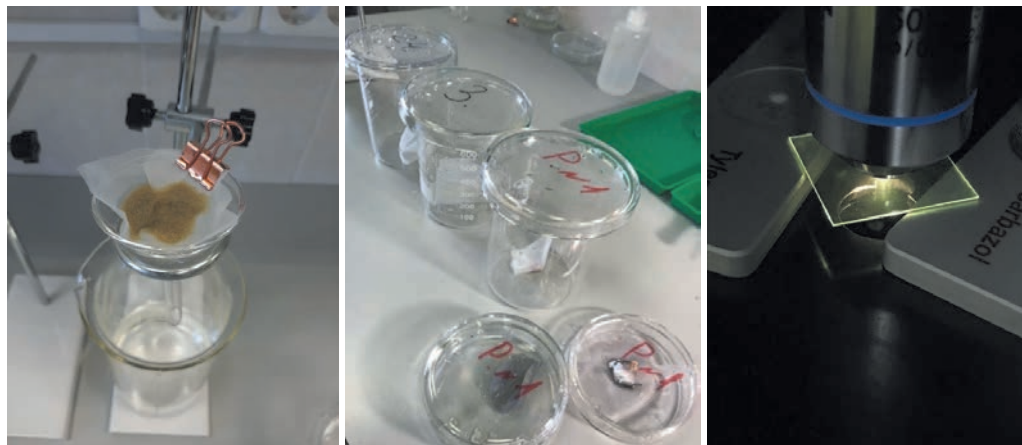


Рис. 2. Процесс лабораторной обработки проб в лаборатории ПластикЛаб РГГМУ и РЦ «Оптические и лазерные методы исследования вещества» СПбГУ (Петергоф, Рамановский спектрометр Senterra (Bruker)).

Fig. 2. The process of sample processing in the PlasticLab laboratory of the Russian State Hydrometeorological University and the Resource Center for Optical and Laser Methods for the Study of Matter, St. Petersburg State University (Peterhof, Raman spectrometer Senterra (Bruker)).

На рис. 2 справа демонстрируется образец под объективом, установленный на предметном столике спектрометра. Оптическая прозрачность покровных стекол, а также достаточное рабочее расстояние объектива позволяли сфокусироваться на образце, отсекая с помощью конфокальной апертуры существенную часть люминесценции покровных стекол, и получить на основании спектра КРС информацию о составе образца. На рис. 3 в качестве примера приводятся спектр КРС и фотография с микрочастицы волокна такого часто встречающегося вида пластика как полиэтилентерефталат (PET).

Исследовалось до 50 % частиц (образцов) из каждой пробы. Все частицы с идентифицируемыми промышленными пигментами рассматривались как вещества искусственного (антропогенного) происхождения и входили в общее число антропогенных полимерных частиц.

Результаты исследований

Для получения оценки содержания микропластика в воде Баренцева и Карского морей в 2019 г. были обработаны пробы с 16 станций — результаты представлены на рис. 4. Содержание антропогенных, в том числе микропластиковых частиц в поверхностном слое (4,5 м) в Баренцевом море варьирует от 0,7 до 28 шт./м³, среднее значение — 8 шт./м³. Концентрации частиц в Карском море варьируют от 1 до 4 шт./м³, среднее значение — 2,5 шт./м³.

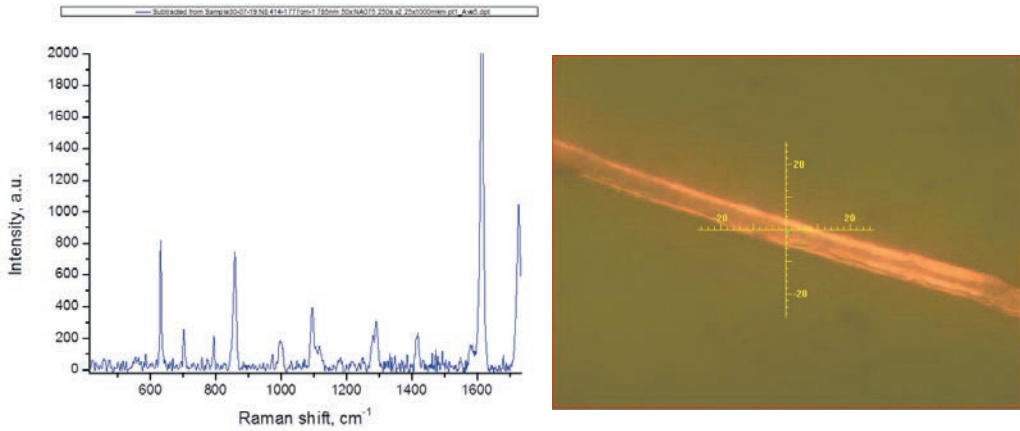


Рис. 3. Слева — пример спектра КРС частицы микропластика: полиэтилентерефталат (PET). Справа — соответствующая фотография частицы. Масштабная шкала приведена в микронах, перекрестью соответствует место съемки.

Fig. 3. Left — examples of Raman spectra of microplastic particles: polyethylene terephthalate PET, right — microparticle photo. Scale bar is shown in microns.

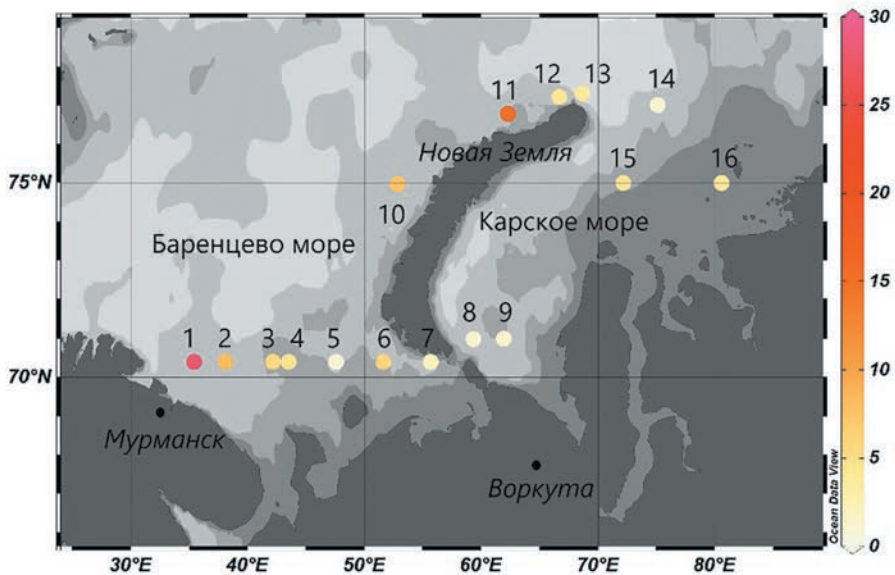


Рис. 4. Содержание антропогенных, в том числе микропластиковых частиц, шт./м³ в «подповерхностном» слое (4,5 м) в 2019 г. в Баренцевом и Карском морях.

Fig. 4. Abundance of anthropogenic, including microplastic particles, items/m³ in the “subsurface” layer (4,5 m) in 2019 in the Barents and Kara Seas.

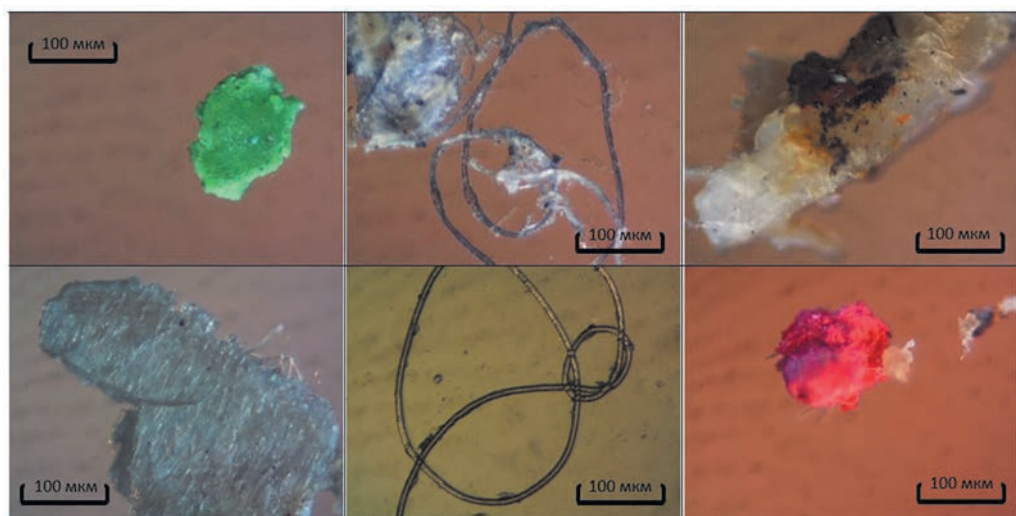


Рис. 5. Примеры частиц микропластика в поверхностных водах Баренцева и Карского морей в 2019 г.: фрагменты и волокна.

Fig. 5. Examples of microplastic particles in the surface waters of the Barents and Kara Seas in 2019: fragments and fibers.

Самая высокая концентрация микрочастиц — 28 шт./м³ была обнаружена на станции 1 вблизи порта Мурманск в южной части Баренцева моря. Самые низкие значения наблюдаются в Карском море (ст. 8, 9 и 14) — 1 шт./м³ (см. рис. 4). Измерения в Баренцевом море выполнялись на океанографическом разрезе (ст. 1—7), характерно уменьшение содержания микропластика с запада на восток в сторону Карских ворот.

Найдены микрочастицы разных форм, размеров и цветов (см. рис. 5), среди которых можно выделить наиболее часто встречающиеся нитевидные прозрачные волокна, присутствовавшие в каждой из проб, а также частицы белого, красного и черного цвета (рис. 6). Наибольшее разнообразие цветов и форм частиц характерно для Баренцева моря. Размер частиц варьировал от 100 до 2000 мкм, при этом наиболее многочисленными являются частицы размером более 500 мкм (см. рис. 6). Распределение микрочастиц по форме для двух морей различается незначительно (рис. 7): примерно половина всех найденных частиц составляют полимерные (или целлюлозные с пигментом) волокна, другая половина — фрагменты разнообразной неправильной формы (отсутствие микрогранул).

Идентификация частиц с помощью спектроскопии КРС позволила определить типы полимера, а также пигментов, которые позволяют идентифицировать частицу как синтетическую (антропогенного происхождения): более половины всех частиц содержат пигмент (рис. 8). Значительный вклад в общее содержание антропогенных частиц вносят микроволокна с определенным пигментом, что позволило отнести их к категории «антропогенные волокна» (например, вискоза).

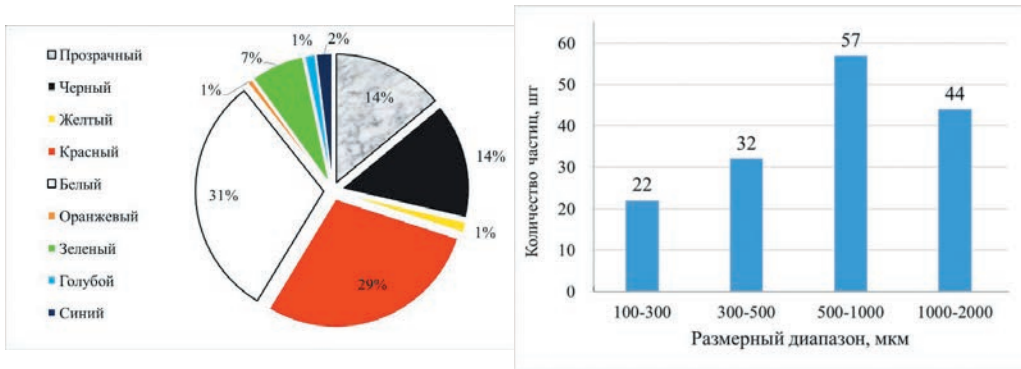


Рис. 6. Категоризация частиц микропластика, идентифицированных в пробах воды Баренцева и Карского морей в 2019 г.: слева — по цвету, справа — по размерному диапазону частиц.

Fig. 6. Categorization of microplastic particles identified in water samples of the Barents and Kara Seas in 2019: on the left — by color, on the right — by particle size range.

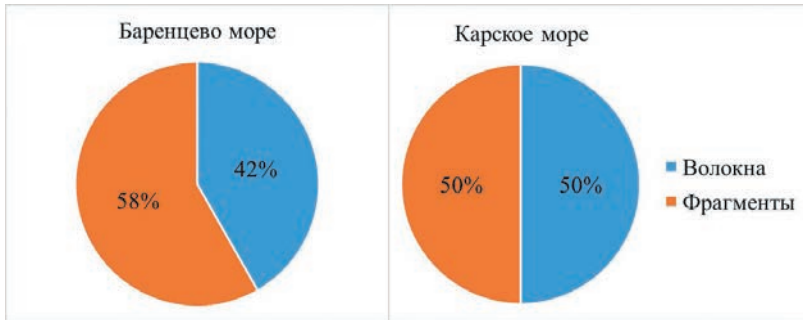


Рис. 7. Морфологический состав антропогенных частиц: волокна и фрагменты.

Fig. 7. Morphological composition of anthropogenic particles: fibers and fragments.

Около трети микрочастиц, найденных в пробах Баренцева моря, и 17 % — в Карском, — это полимеры типа полиэтилентерефталат (PET). Остальные типы полимеров представлены в небольших количествах, однако вызывает интерес значительное количество полимеров типа полилактид (PLA) в водах Карского моря, который является биоразлагаемым (экологичным) полимером, используемым как альтернатива традиционным синтетическим полимерам в быту, а также полиакрилонитрила (PAN) в Баренцевом море — компонента нитроновых волокон (заменитель шерсти). Среди прочих полимеров в обоих морях найдены полипропилен PP и полиэтилен PE.

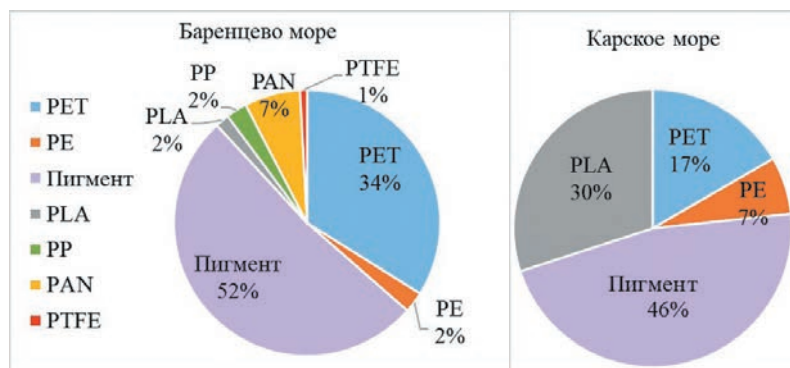


Рис. 8. Химический состав найденных синтетических микропластиков в «подповерхностном» слое (4,5 м) Баренцева и Карского морей в 2019 г.

Fig. 8. Chemical composition of the found synthetic microparticles in the “subsurface” layer (4,5 m) of the Barents and Kara Seas in 2019.

Обсуждение результатов

Баренцево море занимает самое западное положение среди морей России и отличается от остальных морей Северного Ледовитого океана своим температурным режимом, так как круглый год происходит заток теплых Атлантических вод (годовой приток составляет примерно 74 тыс. км³ [26]), которые распространяются на северо- и юго-восток [27]. В период наблюдений в 2019 г. атлантические воды высокой солености 34 ‰ распространялись на юго-восток до Карских ворот, где соленость заметно снижалась до 32 ‰ в результате смешения с более пресными водами Карского моря, что соответствует типичному распределению солености поверхностных вод в этой акватории в позднелетний период (рис. 9).

Результаты исследования показали, что в 2019 г. в морях Западной Арктики максимальные концентрации антропогенных частиц наблюдаются в Баренцевом море — до 28 шт./м³, а минимальные — в Карском — 1 шт./м³, с многократной разницей максимальных и минимальных значений в данной акватории (см. рис. 4). Отмечено постепенное уменьшение содержания микропластиков на разрезе в южной части Баренцева моря с запада на восток (рис. 9 б): у Карских ворот концентрация немного возрастает, а потом снова падает при переходе в Карское море до минимальных значений (1 шт./м³).

В районе архипелага Новая Земля вдоль западной границы острова содержание микропластиков составляло от 7 до 15 шт./м³, однако на северной оконечности архипелага у мыса Желания микропластики в «подповерхностном» слое воды обнаруживались лишь в незначительном количестве (3—4 шт./м³).

Концентрация микропластиковых частиц в акватории Карского моря была минимальной в период наблюдений и менялась от 1 до 4 шт./м³, что, вероятно, свидетельствует об отсутствии влияния атлантических вод в этой части Арктики и в очередной раз подтверждает барьерную роль архипелага Новая Земля в распространении загрязнителей с поверхностными течениями из Северной Атлантики (см. рис. 10).

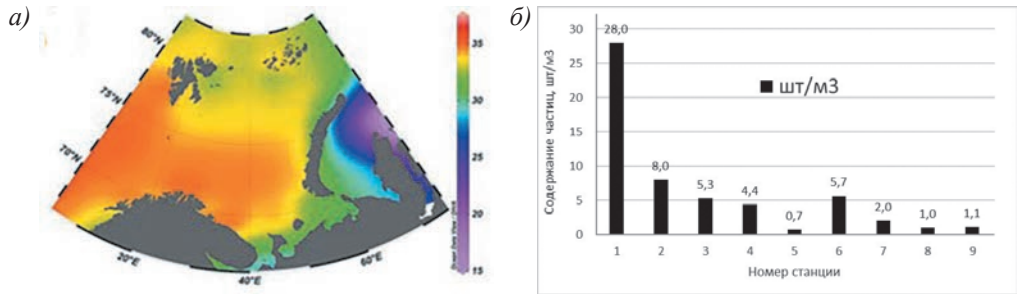


Рис. 9. Соленость воды Баренцева моря на горизонте 0 м в летний период по среднемноголетним значениям (июль—сентябрь (а) [27] и содержание антропогенных микрочастиц, шт./м³ в подповерхностном слое (4,5 м) на океанографическом разрезе в южной части Баренцева моря в августе 2019 г. по данным экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 (б).

Fig. 9. Salinity of surface layer in the Barents Sea in summer according to the long-term average values (July—September (a) [27] and the content of anthropogenic microparticles, items/m³ in the subsurface layer (4,5 m) on the oceanographic section in the southern part of the Barents Sea in August 2019 in TRANSARCTICA-2019 cruise (b).

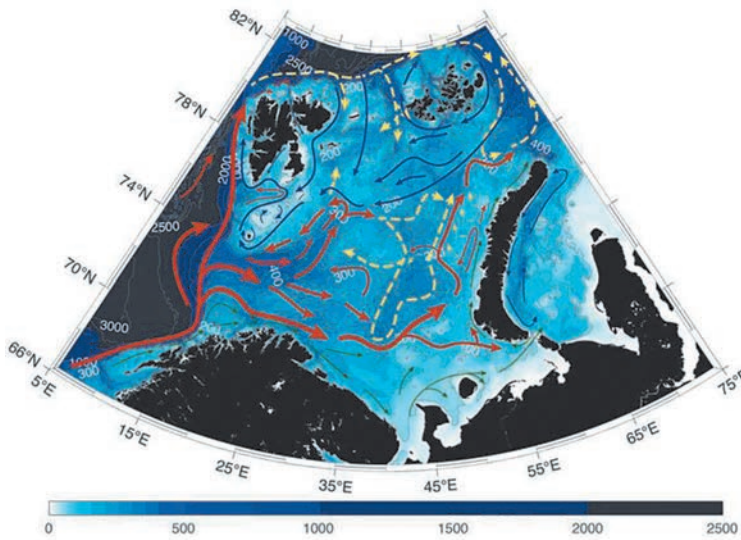


Рис. 10. Схема крупномасштабной циркуляции Баренцева моря в соответствии с [27].
Теплые течения — красные стрелки, холодные течения — синие стрелки, подповерхностные течения — пунктирные стрелки.

Fig. 10. Scheme of the large-scale circulation of the Barents Sea according to [27].
Warm currents — red arrows, cold currents — blue arrows, subsurface currents — dotted arrows.

Однако, повышение концентраций микрочастиц в районе плюмов сибирских рек — с 1 до 4 шт./м³ (станции 15 и 16) может быть связано с выносом частиц (в частности, волокон) с речным стоком. Данная теория впервые была высказана в работе [16] и находит подтверждение в настоящей работе.

Пространственное распределение микрочастиц, связанных с антропогенной деятельностью, идентифицированных в настоящем исследовании, в целом, характерно для рассматриваемой акватории. Баренцево и Карское моря отличаются от других морей СМП большим количеством транспортных путей и видов хозяйственной деятельности в связи со сложившимися климатическими благоприятными условиями для арктической навигации и реализации проектов освоения шельфа. Смещение кромки льда к северу и освобождение больших площадей морской акватории [28] предоставляет возможности расширения районов плавания в сторону высокоширотных путей и к северу от архипелага Новая Земля, что может вызвать значительное увеличение количества судов в акватории Баренцева и Карского морей в летние месяцы, а также расширение районов промысла, которые ограничиваются незамерзающей частью Баренцева моря.

При этом значительно отличаются по транспортной нагрузке северная и южная часть Баренцева моря (см. рис. 11). Всего по СМП в 2019 г. совершено 439 рейсов разной продолжительности (177 судов): из них большая часть — это район Карского моря и Обской губы на маршруте СМП до Мурманска и обратно, более половины (55 %) заходов всех судов на СМП в 2019 г. пришлось на порт Сабетта. При этом август является одним из наиболее активных месяцев в связи с благоприятными навигационными условиями. Таким образом, повышенные концентрации антропогенных микрочастиц, обнаруженные в Баренцевом море в 2019 г., могут быть объяснены, в первую очередь, высокой транспортной нагрузкой не только на СМП, но и в прилегающей акватории Норвежского моря: это предположение подтверждают находки частиц разнообразных форм и ярких

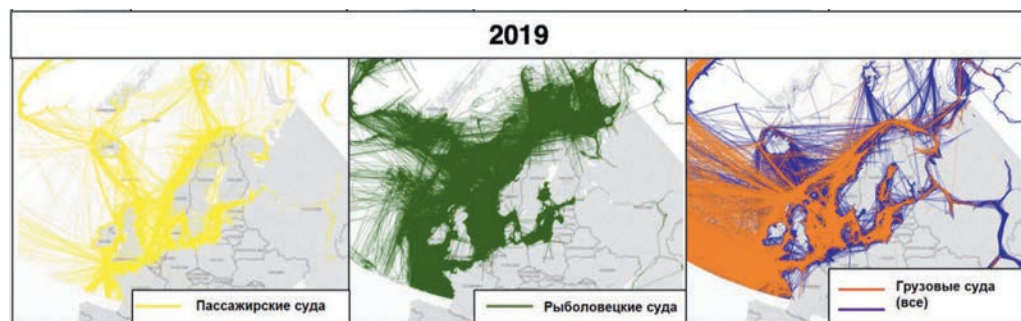


Рис. 11. Морские перевозки в 2019 г. в Баренцевом и Норвежском морях: пассажирские суда, рыболовецкие суда и общее число рейсов грузовых судов разного назначения (источник — база данных havbase.no).

Fig. 11. Marine traffic in 2019 in the Barents and Norwegian Seas: passenger ships, fishing vessels and total number of voyages of cargo ships (according to the havbase.no database).

цветов и наличие в них определяемых пигментов разного типа, присущих лакокрасочным материалам.

Исследования микропластика в рассматриваемой акватории Баренцева и Карского морей начаты всего несколько лет назад, и несмотря на отличие метода отбора проб (манта-трал [15] и нейстонная сеть [20]) и единиц измерения (шт./м²), пространственное распределение микропластика в поверхностных водах Баренцева и Карского морей первых авторов сравнимо с результатами настоящего исследования: наблюдаются схожие тенденции аккумуляции частиц в Баренцевом море напротив центральной части архипелага Новая Земля, а также повышенные концентрации микрочастиц в южной части Баренцева моря. Понижение концентраций наблюдается с продвижением на север, а минимальное содержание микрочастиц антропогенного происхождения зафиксировано в Карском море в 2015 г. [20], 2018 г. [15], а также и в 2019 г. (данное исследование).

Метод использования фильтровальных систем для отбора проб на микропластик применяется в настоящее время во многих международных исследованиях, в том числе как дополнение к другому широко используемому методу — отбор проб нейстонными (буксируемыми) сетями. Однако, результаты отбора проб этими двумя методами сложно сравнивать в связи с разными единицами измерения содержания микропластика в воде (шт. на м² или м³), а также разными размерными фракциями отбираемого микропластика. При отборе проб сетями количество частиц микропластика заведомо ниже (часто на 1—2 порядка), чем количество частиц, отбираемых фильтровальными системами, что было показано различными параллельными исследованиями, в том числе и в Арктической зоне [29—31].

Сравнение полученных разными исследователями в данном регионе концентраций микропластика с помощью метода фильтрации в «подповерхностном» слое воды (глубиной 4—5 м) приведено в табл. 1. В целом, значения, полученные в 2019 г. в рамках экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019, превышают концентрации микропластика, полученные другими исследователями в предыдущие годы. Однако, следует отметить, что в более ранних исследованиях в силу трудоемкости идентификации не учитывались волокна, как, например, в районе архипелага Шпицберген в Баренцевом море [29]. Микроволокна являются важнейшим компонентом микропластикового загрязнения морской среды как результат распада более крупных синтетических материалов (пластиковых сетей и текстильных отходов с судов), а также сбросов жидких бытовых отходов. По причине того, что волокна составляют более половины найденных синтетических микрочастиц в пробах (а иногда — большую часть в поверхностных слоях арктических вод [29]), концентрации микропластика значительно возрастают при их учете. Другой причиной более высоких концентраций антропогенных частиц, полученных в настоящем исследовании, вероятно, является учет всех частиц антропогенного происхождения, включая частицы с идентифицированным пигментом (благодаря методу спектрометрии КРС), что затруднительно при другом более распространенном методе идентификации с помощью ИК-Фурье спектрометрии.

Еще одним немаловажным фактором является выбор маршрута в исследуемой акватории. По сравнению с данными экспедиции ИО РАН [16], в рамках

которой использовались наиболее близкие настоящему исследованию методы отбора (проточной системой судна) в один и тот же период времени (позднелетний период 2019 г.), обнаруженное более высокое среднее содержание микрочастиц в Баренцевом море в рамках экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 связано с обследованием не только южной, но и северной части Баренцева моря (район аккумуляции микропластика). А участники экспедиции ИО РАН на судне «Академик Мстислав Келдыш» [16] отбирали пробы только в южной части моря, где содержание микропластика значительно ниже.

Таблица 1

Концентрации микропластика (в шт./м³) в регионе Западной Арктики по данным современных исследований (использование только фильтровальных и проточных систем, ячейка менее 200 мкм, «подповерхностный» слой — глубина 4—5 м)

Microplastic concentrations (in items/m³) in the Western Arctic region according to modern research data (using only filtering and flow-through systems, cell size less than 200 microns, “subsurface” layer — 4—5 m)

Год наблюдений	Регион	Концентрация МП, шт./м ³		Авторы, ссылка
		Среднее знач.	Мин.—макс. знач.	
2005	Гренландское море	0,99	0—11,5	Amelineau, F. et al. 2016 [32]
2014		2,38		
2014	Баренцево море (арх. Шпицберген)	2,68		Lusher A. L. et al., 2015 [29]
2017	Центр. часть СЛО	0,7		Kanhai La Daana et al., 2018 [33]
2017	Гренландское море	2,4	0—1,8 0,7—28 1—4	Morgana S. et al., 2018 [34]
2019	Баренцево море	0,8		Yakushev E. et al., 2021 [16]
	Карское море	1,0		
2019—2020	Баренцево море	0,85		Pakhomova S. et al., 2022 [35]
2019	Баренцево море	8		Данное исследование (ТРАНСАРКТИКА-2019)
	Карское море (все антропогенные микрочастицы)	2,5		

Значительное количество определенных в ходе анализа пигментов говорит о загрязнении морской воды частицами отслаивающейся краски с судов. Данный вид полимерных частиц, в целом, характерен для морей с высокой транспортной нагрузкой. Однако загрязнение проб воды судном, с которого проводились измерения, маловероятно, в связи с проводимым контролем загрязнения: частицы данного типа встречались только в пробах, отобранных в Баренцевом море, и отсутствовали в пробах из других морей на маршруте экспедиции по СМП в 2019 г. (более 100 шт.).

Интересен полимерный состав идентифицированных в 2019 г. частиц: помимо полимеров традиционных типов (PET, PE, PP) найдено значительное количество частиц из полилактида (PLA), который применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, пакетов, одноразовой посуды. Найденный в пробах полиакрилонитрил (PAN) является компонентом нитроновых волокон,

которые используются главным образом как заменители шерсти при производстве ковров, искусственного меха, а также как теплоизоляционный материал.

Полиэтилентерефталат PET, доминирующий в составе микропластиковых частиц помимо пигментов, является одним из самых распространенных материалов для производства тары, пленки, упаковки, а также многих других используемых в быту материалов (текстиль, ремни, веревки и т.п.).

Отличительной особенностью полимерного состава найденных частиц является то, что это в основном полимеры высокой плотности — то есть с удельной плотностью больше $1,1 \text{ г/см}^3$ (PAN — 1,17, PLA — 1,25, PET — 1,38). Частиц полимеров низкой плотности (PP и PE) было минимальное количество. Этот факт, скорее всего, говорит о недавнем попадании частиц в данную акваторию (со сточными водами проходящих судов).

Максимальное количество синтетических микрочастиц зафиксировано на подходе к порту Мурманск, что, возможно, связано с интенсивным судоходством в этой зоне, а также влиянием Нордкапского течения, которое переносит пластиковый мусор из Норвежского моря.

Заключение

Результаты исследования показали, что в 2019 г. в морях Западной Арктики максимальные концентрации микрочастиц антропогенного происхождения зафиксированы в Баренцевом море — до 28 шт./м^3 , а минимальные — в Карском, 1 шт./м^3 , с разницей максимальных и минимальных значений в данных морях в несколько раз. В составе проб преобладают микроволокна (более 50 %), а также волокна с идентифицированными пигментами. Наиболее многочисленными являются частицы размером более 500 мкм.

В ходе первых исследований содержания микропластика в морской воде в этой части Западной Арктики в 2018 г. [15] было показано значительное превышение содержания микропластика в поверхностном слое в Баренцевом море по сравнению с Карским, а по абсолютным показателям значения были сравнимы с центрами субтропических круговоротов. Результаты настоящего исследования, проведенного в 2019 г., подтверждают эту тенденцию: действительно наблюдаются значительные концентрации микропластика в поверхностных водах Баренцева моря в сравнении с Карским морем и морями Российской Арктики. У западных побережий архипелага Новая Земля концентрации микрочастиц превышают подобные концентрации, полученные для арктических морей [17], в 10—20 раз.

Исследование 2019 г. в рамках программы ТРАНСАРКТИКА-2019 подтвердило теорию аккумуляции микропластика в центральной части Баренцева моря в районе архипелага Новая Земля и барьерную роль архипелага в переносе загрязнителей в Карское море. Однако, преобладание более «тяжелых» частиц микропластика (с высокой удельной плотностью, более $1,15 \text{ г/см}^3$) говорит о том, что, скорее всего, источниками этих частиц являются стоки с проходящих судов, а не отдаленные источники из густонаселенных регионов Атлантики, как предполагалось ранее некоторыми авторами [10]. Обилие «тяжелых» частиц в поверхностном слое моря говорит, скорее, о том, что данные частицы появились в море совсем

недавно. Таким образом, механизмом поступления микропластика в центральную и северную часть Баренцева моря, в место их аккумуляции, или так называемое «шестое» мусорное пятно, следует считать теплые поверхностные течения, несущие пластиковые отходы из южной части Баренцева моря, а также из соседних акваторий морей (Норвежское и Северное). Не исключены источники на побережье, такие крупные порты как Мурманск, Архангельск, Сабетта, и поступление микропластика со стоком реки Северная Двина [36].

При этом важнейшим источником микропластика в данных акваториях следует рассматривать крупный пластиковый мусор, который аккумулируется на побережьях архипелага Новая Земля в результате выброса отходов с рыболовецких и грузовых судов и под влиянием интенсивного процесса фотоокисления достаточно быстро превращается в частицы микропластика, которые попадают в морскую среду Баренцева моря [13].

Области накопления микропластика в Карском море, поступающего с речным стоком, могут формироваться в маргинальных фильтрах эстуариев Оби и Енисея [37], областях лавинной седиментации, границы расположения которых меняются в зависимости от скорости оседания взвеси, скорости течения, а также режима смешения речной и морской воды (от наклона изогалин) [38]. В связи с этим, именно эти области требуют отдельного дальнейшего исследования путей распространения и накопления микропластика.

Приложение V к Конвенции МАРПОЛ и Лондонская конвенция, в целом, запрещают сброс мусора в море. Кроме того, § 27 Норвежского закона о борьбе с загрязнением запрещает удаление мусора как на суше, так и на море, а Норвежский закон о морских ресурсах запрещает сброс или оставление рыболовных снастей. Закон Шпицбергена об охране окружающей среды также запрещает сброс мусора с судов. Тем не менее, представленные данные подчеркивают, что действующего законодательства недостаточно для борьбы с загрязнением арктических экосистем. Это создает дополнительный стресс для арктической дикой природы, которая и без того испытывает сильное воздействие вследствие интенсивного потепления Северного Ледовитого океана.

Список источников

1. Plastics — the Facts 2021: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf (дата обращения: 21.10.2022).
2. Frias J. P. G. L., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition // Marine pollution bulletin. 2019. Vol. 138. P. 145—147.
3. GESAMP Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment // Reports and Studies 90. 2015. 96 p.
4. Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И., Исаченко И. А., Буканова Т. В. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир, 2021. 520 с.
5. Çobanoğlu H., Belivermiş M., Sıkdokur E., Kılıç Ö., Çayır, A. Genotoxic and cytotoxic effects of polyethylene microplastics on human peripheral blood lymphocytes // Chemosphere. 2021. Vol. 272: 129805. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129805.
6. Ragusa A., A. Svelato, C. Santacroce, P., Catalano P., Notarstefano V., Carnevali O., Papa F., Rongioletti M. C. A., Baiocco F., Draghi S., D'Amore E., Rinaldo D., Matta M., Giorgini E. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment International. 2021. Vol. 146: 106274. doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.

7. Rist S., Almroth B. C., Hartmann N. B., Karlsson T. M. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics, *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 626. P. 720—726. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.092.
8. Wu D., Feng Y., Wang R., Jiang J., Guan Q., Yang X., Wei H., Xia Y., Luo Y. Pigment microparticles and microplastics found in human thrombi based on Raman spectral evidence // *Journal of Advanced Research*. 2022 (in press), doi: 10.1016/j.jare.2022.09.004.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen G. W., Provencher J. F., Rochman C. M., Seville E. van, Tekman M. B. Plastic pollution in the Arctic // *Nat Rev Earth Environ*. 2022. Vol. 3. P. 323—337. doi: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. Seville E. van, England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7: 044040.
11. Gavrilov M. Plastic pollution and seabirds in the Russian Arctic // *Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF)*. 2019. 125 p.
12. Vesman A., Moulin E., Egorova A., Zaikov K. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago. *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 150: 110671.
13. Ershova A., Vorotnichenko E., Kotelnikov V., Krutikov I. Marine litter accumulation patterns in the Russian part of the Barents Sea // MICRO 2022 conference (14—18 November 2022): [Электронный ресурс]. Режим доступа: sciencesconf.org/micro2022:427312.
14. Pogojeva M., Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A., Lapenkov A., Kosmach D., Osadchiev A., Hanke G., Semiletov I., Yakushev E. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 166: 112201.
15. Tošić N., Vrugink M., Vesman A. Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 161 (A): 111745. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111745.
16. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Commun. Earth Environ*. 2021. Vol. 2: 23. doi: 10.1038/s43247-021-00091-0.
17. Ершова А. А., Еремина Т. Р., Дунаев А. Л., Макеева И. Н., Татаренко Ю. А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // *Арктика: экология и экономика*. 2021. № 11(2). С. 164—177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177.
18. Ershova A., Makeeva I., Maligna E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional science for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic) // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 173 (A): 112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955.
19. Pakhomova S., Zhdanov I., van Bavel B. Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR) // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (23): 8707.
20. Cózar A., Martí E., Duarte C. M., García-de-Lomas J., van Seville E., Ballatore T., Eguiluz V., González-Gordillo J. I., Pedrotti M., Echevarría F., Troublé R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // *Science advances*. 2017. Vol. 3 (4). P. 1—8. doi: 10.1126/sciadv.1600582.
21. Nord University. Data Visualization. NSR navigation in 2019: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arctic-liv.com/main-results-of-nsr-navigation-2019/> (дата обращения: 21.10.2022).
22. Ершова А. А., Татаренко Ю. А. Пробоотборник для определения содержания микропластика в морской воде (HydroPuMP). Патент на полезную модель 206110 U1, 24.08.2021. Заявка № 2020144043 от 28.12.2020.
23. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification // *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46 (6). P. 3060—3075. doi: 10.1021/es2031505.
24. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway, 2021. 257 p.
25. Shim W., Hong S., Eo S. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical methods*. Royal Society of Chemistry. 2017. Vol. 9: 1384. doi: 10.1039/c6ay02558g.
26. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 254 с.

27. Писарев С. В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. 672 с. doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8.
28. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 98—109.
29. Lusher A., Tirelli V., O'Connor I., Officer R. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5: 14947. doi: 10.1038/srep14947.
30. Rist S., Vianello A., Sichlau M. H., Winding M. H. S., Nielsen T. G., Almeda R., Torres R. R., Vollertsen J. Quantification of plankton-sized microplastics in a productive coastal Arctic marine ecosystem // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266 (1): 115248. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115248.
31. Tekman M. B., Wekerle C., Lorenz C., Primpke S., Hasemann C., Gerdt G., Bergmann M. Tying up loose ends of microplastic pollution in the Arctic: distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN observatory // *Env. Sci. & Techn.* 2020. Vol. 54 (7). P. 4079—4090.
32. Amelineau F., Bonnet D., Heitz O., Mortreux V., Harding A. M. A., Karnovsky N., Walkusz W., Fort J., Grémillet D. Microplastic pollution in the Greenland Sea: background levels and selective contamination of planktivorous diving seabirds // *Environ. Pollut.* 2016. Vol. 219. P. 1131—1139. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.017.
33. Kanhai L. D., Gärdfeldt K., Lyashevskaya O., Hassellöv M., Thompson R. C., O'Connor I. Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. Vol. 130. P. 8—18.
34. Morgana S., Ghigliotti L., Estévez-Calvar N., Stifanese R., Wieczorek A., Doyle T., Christiansen J. S., Faimali M., Garaventa F. Microplastics in the Arctic: a case study with sub-surface water and fish samples off Northeast Greenland // *Environ. Pollut.* 2018. Vol. 242. P. 1078—1086.
35. Pakhomova S., Berezina A., Lusher A. L., Zhdanov I., Silvestrova K., Zavialov P., van Bavel B., Yakushev E. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 298: 118808. doi: 10.1016/j.envpol.2022.118808.
36. Zhdanov I., Lokhov A., Belesov A., Kozhevnikov A., Pakhomova S., Berezina A., Frolova N., Kotova E., Leshchev A., Wang X., Zavialov P., Yakushev E. Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 175: 113370. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113370.
37. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. № 5. С. 735—748.
38. Ерёмкина Т. Р., Шипунова Е. А. Моделирование трансформации растворенного и взвешенного органического вещества в эстуарии реки Енисей // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 57. С. 46—59. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-46-59.

References

1. Plastics — the Facts 2021. Available at: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf (accessed on: 21.10.2022).
2. Frias J. P. G. L., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine pollution bulletin*. 2019;(138):145—147.
3. GESAMP Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. *Reports and Studies* 90. 2015: 96 p.
4. Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Khatmullina L. I., Lobchuk O. I., Isachenko I. A., Bukanova T. V. *Mikroplastik v morskoi srede = Microplastics in the marine environment*. Moscow: Nauchny Mir, 2021. 520 p. (In Russ.).
5. Çobanoğlu H., Belivermiş M., Sıkdokur E., Kılıç Ö., Çayır A. Genotoxic and cytotoxic effects of polyethylene microplastics on human peripheral blood lymphocytes. *Chemosphere*. 2021;(272):129805. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129805.
6. Ragusa A., A. Svelato, C. Santacroce, P. Catalano P., Notarstefano V., Carnevali O., Papa F., Rongioletti M. C. A., Baiocco F., Draghi S., D'Amore E., Rinaldo D., Matta M., Giorgini E. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*. 2021;(146):106274. doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.

7. Rist S., Almroth B. C., Hartmann N. B., Karlsson T. M. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Science of The Total Environment*. 2018;(626):720—726. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.092.
8. Wu D., Feng Y., Wang R., Jiang J., Guan Q., Yang X., Wei H., Xia Y., Luo Y. Pigment microparticles and microplastics found in human thrombi based on Raman spectral evidence. *Journal of Advanced Research*. 2022 (in press). doi: 10.1016/j.jare.2022.09.004.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen G. W., Provencher J. F., Rochman C. M., Seville E. van, Tekman M. B. Plastic pollution in the Arctic. *Nat Rev Earth Environ*. 2022;(3):323—337. doi: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. Seville E. van, England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters* 2012;(7):044040.
11. Gavrilov M. Plastic pollution and seabirds in the Russian Arctic. *Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF)*. 2019: 125 p.
12. Vesman A., Moulin E., Egorova A., Zaikov K. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;(150):110671.
13. Ershova A., Vorotnichenko E., Kotelnikov V., Krutikov I. Marine litter accumulation patterns in the Russian part of the Barents Sea. MICRO 2022 conference (14—18 November 2022). Available at: sciencesconf.org/micro2022:427312.
14. Pogojeva M., Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A., Lapenkov A., Kosmach D., Osadchiv A., Hanke G., Semiletov I., Yakushev E. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;(166):112201.
15. Tošić N., Vrugink M., Vesman A. Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;161(A):111745. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111745.
16. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiv A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers. *Commun. Earth Environ*. 2021;(2):23. doi: 10.1038/s43247-021-00091-0.
17. Ershova A. A., Eremina T. R., Dunaev A. L., Makeeva I. N., Tatarenko Yu. A. Study of microplastic pollution in the seas of the Russian Arctic and the Far East. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2021;11(2):164—177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177. (In Russ.).
18. Ershova A., Makeeva I., Maligna E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional science for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic). *Marine Pollution Bulletin*. 2021;173(A):112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955.
19. Pakhomova S., Zhdanov I., Bavel B. van. Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR). *Applied Sciences*. 2020;10(23):8707.
20. Cózar A., Martí E., Duarte C. M., García-de-Lomas J., Seville E. van, Ballatore T., Eguíluz V., González-Gordillo J. I., Pedrotti M., Echevarría F., Troublé R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Science advances*. 2017;3(4):1—8. doi: 10.1126/sciadv.1600582.
21. Nord University. Data Visualization: NSR navigation in 2019. Available at: <https://arctic-lio.com/main-results-of-nsr-navigation-2019> (accessed at: 21.10.2022).
22. Ershova A. A., Tatarenko Yu. A. *Probootbornik dlia opredeleniia sodержaniia mikroplastika v morskoi vode (HydroPuMP) Patent na poleznuiu model' 206110 U1, 24.08.2021. = Sampler for determining the content of microplastics in sea water (HydroPuMP). Utility model patent 206110 U1, 08/24/2021. Application No. 2020144043 dated 12/28/2020.*
23. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*. 2012;46(6):3060—3075. doi: 10.1021/es2031505.
24. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 2021: 257 p.
25. Shim W., Hong S., Eo S. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical methods. Royal Society of Chemistry*. 2017;(9):1384. doi: 10.1039/c6ay02558g.
26. Dobrovolsky A. D., Zalagin B. S. *Morya SSSR = Seas of the USSR*. Moscow: Moscow State University, 1982: 254 p. (In Russ.).

27. Pisarev S. V. Review of the hydrological conditions of the Barents Sea. *Sistema Barentseva moria = System of the Barents Sea*. Moscow: GEOS, 2021: 672 p. (In Russ.). doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8.
28. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the ice-free regime of the Arctic regions come? *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific papers of RSHU*. 2019;(56):98—109.
29. Lusher A., Tirelli V., O'Connor I., Officer R. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Sci. Rep.* 2015;(5):14947. doi: 10.1038/srep14947.
30. Rist S., Vianello A., Sichlau M. H., Winding M. H. S., Nielsen T. G., Almeda R., Torres R. R., Vollertsen J. Quantification of plankton-sized microplastics in a productive coastal Arctic marine ecosystem. *Environmental Pollution*. 2020;266(1):115248. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115248.
31. Tekman M. B., Wekerle C., Lorenz C., Primpke S., Hasemann C., Gerdtz G., Bergmann M. Tying up loose ends of microplastic pollution in the Arctic: distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN observatory. *Env. Sci. & Techn.* 2020;54(7):4079—4090.
32. Amelineau F., Bonnet D., Heitz O., Mortreux V., Harding A. M. A., Karnovsky N., Walkusz W., Fort J., Grémillet D. Microplastic pollution in the Greenland Sea: background levels and selective contamination of planktivorous diving seabirds. *Environ. Pollut.* 2016;(219):1131—1139. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.017.
33. Kanhai L. D., Gårdfeldt K., Lyashevskaya O., Hassellöv M., Thompson R. C., O'Connor I. Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin. *Mar. Pollut. Bull.* 2018;(130):8—18.
34. Morgana, S., Ghigliotti, L., Estévez-Calvar N., Stifanese R., Wieckzorek A., Doyle T., Christiansen J. S., Faimali M., Garaventa F. Microplastics in the Arctic: a case study with sub-surface water and fish samples off Northeast Greenland. *Environ. Pollut.* 2018;(242):1078—1086.
35. Pakhomova S., Berezina A., Lusher A. L., Zhdanov I., Silvestrova K., Zavialov P., Bavel B. van, Yakushev E. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica, *Environmental Pollution*. 2022;(298):118808. doi: 10.1016/j.envpol.2022.118808.
36. Zhdanov I., Lokhov A., Belesov A., Kozhevnikov A., Pakhomova S., Berezina A., Frolova N., Kotova E., Leshchev A., Wang X., Zavialov P., Yakushev E. Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean, *Marine Pollution Bulletin*. 2022;(175):113370. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113370.
37. Lisitsyn A. P. Marginal filter of the oceans. *Okeanologiya = Oceanology*. 1994;(5):735—748.
38. Eremina T. R., Shipunova E. A. Modeling of the transformation of dissolved and suspended organic matter in the estuary of the Yenisei River. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2019;(57):46—59. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-46-59.

Информация об авторах

Александра Александровна Ершова, канд. геогр. наук, доцент кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, заведующая Лабораторией исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», Российский государственный гидрометеорологический университет, ershova@rshu.ru.

Татьяна Рэмовна Ерёмкина, канд. физ.-мат. наук, доцент, директор Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, tanya.er@gmail.com.

Ирина Николаевна Макеева, магистрант Российского государственного гидрометеорологического университета, инженер Лаборатории исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», zelsl@mail.ru.

Дмитрий Васильевич Панькин, канд. физ.-мат. наук, специалист по спектроскопии комбинационного рассеяния света ресурсного центра «Оптические и лазерные методы исследования веществ» Научного парка, Санкт-Петербургский государственный университет, dmitrii.pankin@spbu.ru.

Юрий Алексеевич Татаренко, ассистент кафедры океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, ugueeees@gmail.com.

Анфиса Владимировна Березина, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, fisa4247@gmail.com.

Анастасия Сергеевна Кузьмина, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, инженер Лаборатории исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», kuzmina_a98@yahoo.com.

Information about authors

Alexandra A. Ershova, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Department of Geoecology, Nature Management and Environmental Safety, Head of Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab, Russian State Hydrometeorological University.

Tatyana R. Eremina, PhD (Phys.-Math. Sci.), Associate Professor, Director of the Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University.

Irina N. Makeeva, master student of the Russian State Hydrometeorological University; engineer in Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab.

Dmitry V. Pankin, PhD (Phys.-Math. Sci.), specialist of Resource center “Optical and laser materials research” of Research Park of SPSU, St. Petersburg State University.

Yury A. Tatarenko, Assistant of the Department of Oceanology, Russian State Hydrometeorological University.

Anfisa V. Berezina, researcher, P. P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS.

Anastasia S. Kuzmina, post-graduate student of the Russian State Hydrometeorological University, engineer in Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 02.10.2022

Принята в печать 27.11.2022

The article was received on 02.10.2022

The article was accepted 27.11.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 712—721.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):712—721.

Научная статья

УДК [614.771:632.122](470.46)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-712-721

Оценка возможного воздействия Астраханского газового комплекса на почвенный покров за пределами санитарно-защитной зоны

Анна Анатольевна Токарева

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия,
marga_gamma@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена начальному этапу исследований возможного загрязнения почвенного покрова территории, прилегающей к санитарно-защитной зоне (СЗЗ) Астраханского газового комплекса (АГК), в районе населенных пунктов. Исходя из преимущественного направления ветров юго-восточного направления, наибольшая техногенная нагрузка от возможных газовых выбросов источников АГК приходится на западную и юго-западную часть территории. Не исключается и естественный перенос газовых выбросов за пределы СЗЗ, шириной 5 км, от границ промышленных объектов. Впервые, за последние 10 лет, сопоставлены фактические данные о концентрациях веществ в воздухе и почвах. На отдельных участках территории установлена устойчивая сульфуризация почв в результате поступления соединений серы в составе выбросов комплекса и переноса с загрязненных участков при ветровой эрозии.

Ключевые слова: почвенный покров, соединения серы, ветровая эрозия, группа суммаций, Астраханский газовый комплекс, санитарно-защитная зона

Для цитирования: Токарева А. А. Оценка возможного воздействия Астраханского газового комплекса на почвенный покров за пределами санитарно-защитной зоны // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 712—721. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-712-721.

Original article

Assessment of the Astrakhan gas complex's potential affecting the soil cover outside the sanitary protection zone

Anna A. Tokareva

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, marga_gamma@mail.ru

Summary. The article is devoted to the initial stage of studies of possible contamination of the soil cover of the territory adjacent to the sanitary protection zone (SPZ) of the Astrakhan gas Complex (AGC), in the area of settlements. The gas complex has been operating since 1987, with the soil cover studies being conducted only within the SPZ over the past 10 years. Due to the planned commissioning of new facilities, it becomes necessary to assess the condition of soils outside the SPZ complex, since the deterioration of soil

© Токарева А. А., 2022

properties is one of the strongest factors in the formation of zones of environmental risk, crisis or disaster. Based on the predominant south-easterly winds, the greatest man-made gas emissions load from AGC sources falls on the western and south-western part of the territory. The natural transfer of gas emissions outside the SPZ of 5 km width from the borders of industrial facilities is not excluded. Soils in the area of settlements adjacent to the SPZ belong to floodplain. These are meadow-gray ilmen desertified soils formed on the terraces of ilmen. Floodplain soils are experiencing both agricultural and industrial stress. One of the ways of industrial pollution of floodplain soils of the territory is the deposition of polluting elements from the objects of the complex on the soil surface. The potential of such lands has been revealed only by 30 %. The development of meadow soils is a huge reserve for the development of agriculture in the region. For the first time, the actual data on the concentrations of substances in the air and soils have been compared. In some areas of the territory, stable sulfurization of soils has been established as a result of the intake of sulfur compounds as part of emissions and transfer from contaminated sites during wind erosion.

Keywords: soil cover, sulfur compounds, wind erosion, summation group, Astrakhan gas complex, sanitary protection zone.

For citation: Tokareva A. A. Assessment of the Astrakhan gas complex's potential affecting the soil cover outside the sanitary protection zone. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):712—721. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-712-721. (In Russ.).

Введение

Промышленное освоение территории Астраханского газоконденсатного месторождения привело к нарушению естественного равновесия природной среды [1]. Располагаясь большей частью в полупустынной зоне, в условиях аридного климата, со средним количеством осадков около 200 мм в год, территория активно подвергается эоловой переработке рельефа, усиленной планировкой площадок при строительстве объектов комплекса [2]. АГК с широко развитой инфраструктурой на общей площади 742 км², является мощным источником загрязняющих веществ, напрямую и опосредованно воздействующих на почвенный покров. Прямое воздействие оказывают открытые склады комовой серы, сброс условно чистых стоков на полях орошения, другие источники. Опосредованное влияние оказывают выбросы в атмосферу вредных и токсичных веществ общим объемом свыше 80 тыс. т в год, такие как: оксид серы, азота, сероводород, серная пыль, углеводороды, меркаптаны, аммиак, сажа, микроэлементы.

Исходя из преимущественного направления ветров юго-восточного направления [3], наибольшая техногенная нагрузка от газовых выбросов источников АГК приходится на западную и юго-западную часть территории. Не исключается и естественный перенос газовых выбросов за пределы СЗЗ, шириной 5 км, от границ промышленных объектов. Кроме того, при таком направлении ветра возможен и зафиксирован перенос загрязняющих веществ не только с промышленных площадок комплекса, но и других регионов, добывающих и перерабатывающих углеводородное сырье (например, район Казахстана) [4].

В итоге уровень загрязнения почвенного покрова на территории, прилегающей к санитарно-защитной зоне, может приравниваться к высокой зоне риска и способствовать необратимым изменениям его физико-химического состава [5], высоким затратам на ремедиацию, другим негативным последствиям. Нужно отметить, что похожие задачи по рекультивации загрязненного почвенного покрова решаются и в других исследованиях [6, 7].

Целью исследования является формирование системы оценки уровня загрязнения почвенного покрова за пределами санитарно-защитной зоны от возможного воздействия АГК — источника выбросов соединений серы в атмосферу.

Методика исследования

Оценка и динамика загрязнения атмосферы и почвенного покрова в пределах СЗЗ комплекса проведена по литературным и справочным источникам. В качестве исходных данных использованы материалы ведомственной службы охраны окружающей среды предприятия, обеспечивающей регламентированный постоянный контроль в пределах СЗЗ и стационарного поста регионального органа Росгидромета в поселке Аксарайский (участок 1, промышленная зона АГК). Кроме того, были использованы материалы исследований, лаборатории охраны окружающей среды Астраханского научно-исследовательского и проектного института. Необходимо отметить, что на основании многолетних натурных замеров, выполненных вышеупомянутыми организациями, расчетов рассеивания загрязняющих веществ от источников АГК в атмосфере, оценке влияния выбросов на состояние почв и поверхностных водоемов в работе [8] выполнено обоснование размеров санитарно-защитной зоны.

Для оценки состояния почвенного покрова в непосредственной близости от границ СЗЗ, в зоне возможного воздействия комплекса были выбраны участки населенных пунктов: поселки Комсомольский, Сеитовка и Степное.

Качественный состав почв определен на основе собственных полевых исследований. Для химического анализа объединенная проба составлялась из пяти точечных проб, взятых из одного горизонта с глубины 0—20 см (рис. 1).

Анализ водной вытяжки в исследуемых почвах проведен общепринятым методом по Е. В. Аринушкиной [9], методы анализа нитратов и подвижной серы выполнялись по ГОСТам. Определение нитратов — ГОСТ 26951–86 «Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом», определение подвижной серы в почвах — ГОСТ 26490–85 «Почвы. Определение подвижной серы по методу ЦИНАО». Анализы выполнены в специализированной лаборатории.

Результаты исследований

В качестве отправной точки приняты фоновые значения загрязняющих веществ воздуха в поселках Комсомольский, Сеитовка, Степное, а также по поселку Аксарайский, наиболее близко расположенному пункту к АГК, за период 2009—2020 гг. (табл. 1).

За период наблюдений с 2009 по 2020 г. в промышленной зоне АГК отмечены превышения ПДК по следующим показателям (рис. 2):

- диоксид серы, максимальная величина превысила 3 ПДК (2009 г.);
- диоксид азота, максимальные концентрации значительно выше и в основном превышают допустимые нормативы (2017 г.);
- сероводород, максимальная величина превышения допустимых нормативов отмечалась в пределах 3 ПДК (2013 г.).

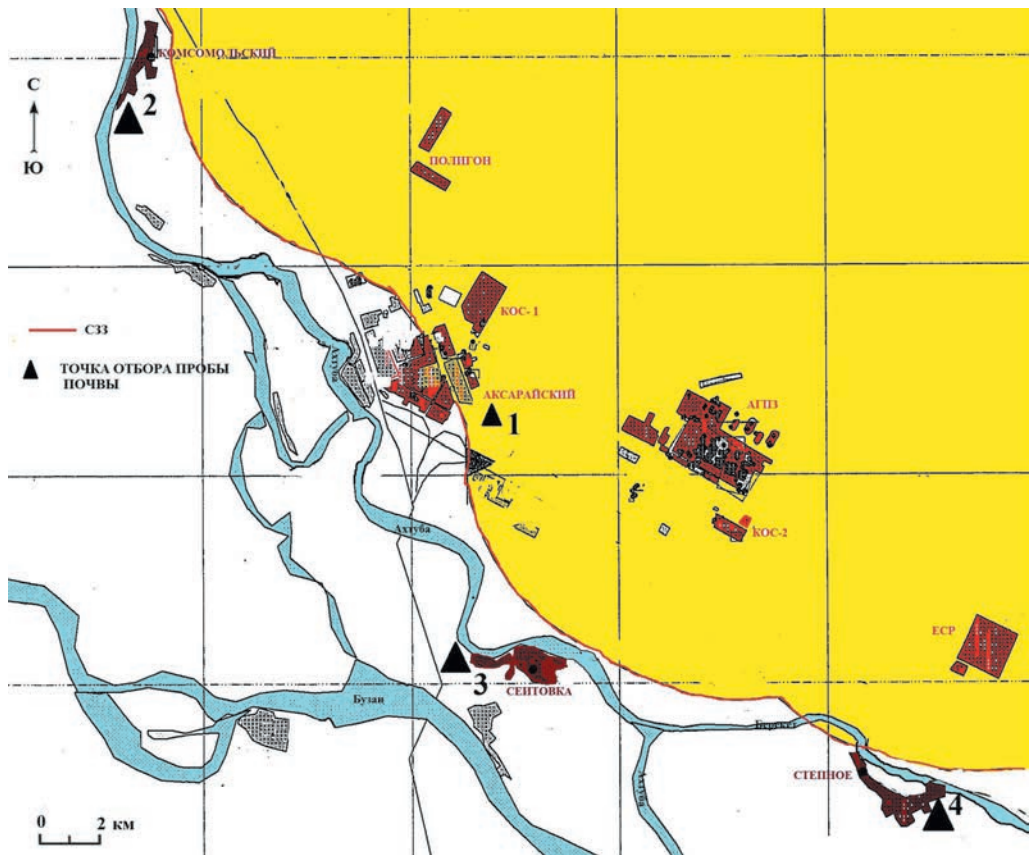


Рис. 1. Районы исследования:

1 участок — промышленная зона АГК; 2 участок — п. Комсомольский;
3 участок — п. Сеитовка; 4 участок — п. Степное.

Fig. 1. Research areas:

1 site — AGK industrial zone; 2 site — Komsomolsky settlement; 3 site — Seitovka settlement;
4 site — Stepnoye settlement.

Таблица 1

Фоновые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе
2009—2020 гг.

Background concentrations of pollutants in atmospheric air 2009—2020

Код вещества	Вещество, мг/м ³	Наименование пункта				ПДК _{мр}
		Аксаарайский	Комсомольский	Сеитовка	Степное	
0330	Диоксид серы (SO ₂)	0,005	0,011	0,012	0,015	0,500
0301	Диоксид азота (NO ₂)	0,030	0,050	0,040	0,050	0,200
0333	Сероводород (H ₂ S)	0,002	0,004	0,004	0,005	0,008

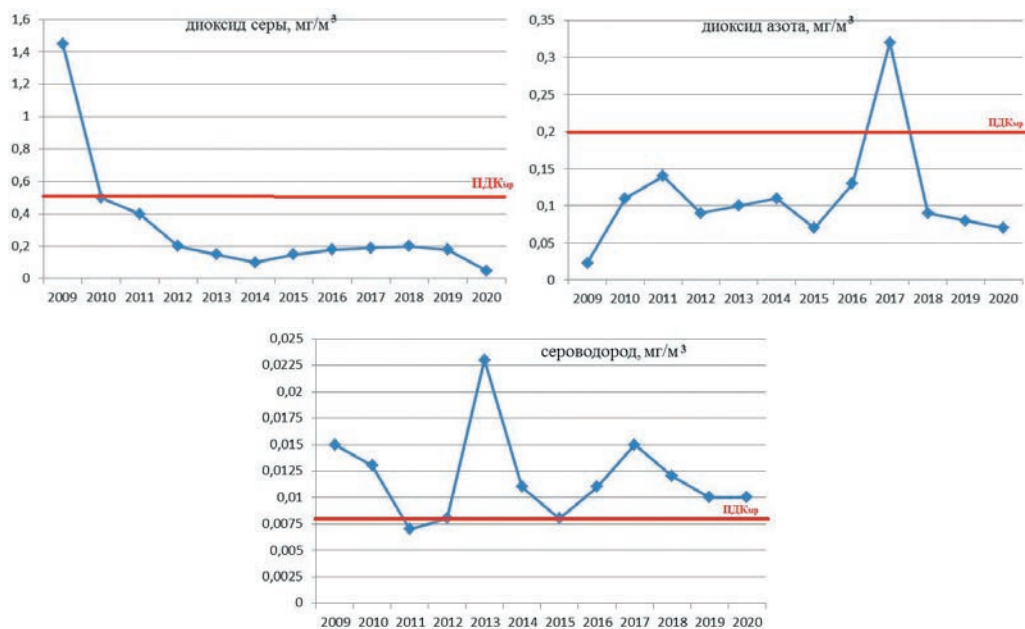


Рис. 2. Динамика содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе п. Аксарайский (максимальные концентрации), 2009—2020 гг.

Fig. 2. Dynamics of the content of pollutants in the atmospheric air of Aksaraysky settlement (maximum concentrations), 2009—2020.

В рамках исследования приведено распространение концентраций веществ в почвах в зависимости от расстояния и воздействия ветра на распространение веществ загрязнителей (группа суммаций — обладающие эффектом полной суммации, т. е. равняется сумме концентраций входящих в нее веществ в долях ПДК).

Расчеты рассеяния (2020 г.) загрязняющих веществ с учетом существующих уровней загрязнения атмосферы (рис. 3), показывают, что основными загрязнителями являются группа суммации: 6009 (0,78 ПДК на границе СЗЗ у п. Степное и 0,79 ПДК в самом поселке); 6043 (0,99 ПДК на границе СЗЗ у п. Степное и 0,97 ПДК в самом поселке).

Выполнены наблюдения за динамикой состояния почвенного покрова по участку № 1 (п. Аксарайский), в зоне влияния АГК (СЗЗ) с учетом характерных загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах объектов АГК: оксида серы, азота, сероводорода. Необходимо отметить, что исследования проводились по двум типам почв.

Почвы полупустынной зоны комплекса в районе СЗЗ относятся к пескам с разной степенью зарастания, слабогумусированным песчаным, бурым полупустынным с различной степенью засоления. Формирование почв шло в условиях ветровой эрозии, в результате перевеяния песчаных эоловых отложений, подстилаемых песками и супесями. Почвы щелочные, реакция водной вытяжки — слабощелочная

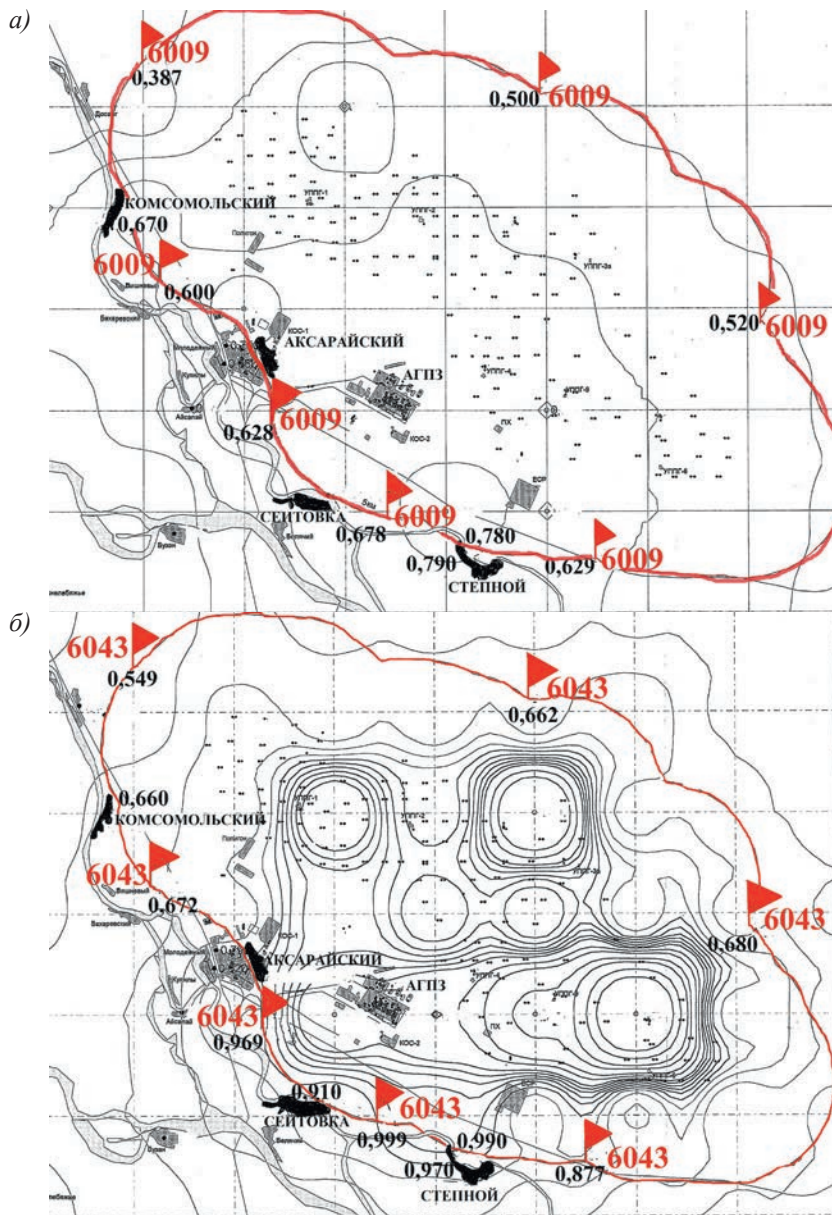


Рис. 3. Группа суммации у п. Степное:

- а) 6009 (0301 — азота диоксид; 0330 — сера диоксид);
 б) 6043 (0330 — сера диоксид; 0333 — сероводород).

Fig. 3. Summation group at Stepnoye:

- а) 6009 (0301 — nitrogen dioxide; 0330 — sulfur dioxide);
 б) 6043 (0330 — sulfur dioxide; 0333 — hydrogen sulfide).

($pH = 8,46—8,84$). Содержание сульфатов изменяется в широких пределах (в среднем составляет от 85 до 506 мг/кг при ПДК — 160 мг/кг). Концентрация нитратов в поверхностных горизонтах почвы варьирует в среднем от 3,5 до 11,4 мг/кг и не превышает ПДК (130 мг/кг). Среднее содержание нитратов увеличилось в настоящее время в 2,3 раза, по сравнению с данными за период 2009—2019 гг. Такие колебания содержания нитратов нельзя считать существенными, они зависят от конкретных климатических условий.

Почвы в зоне возможного воздействия АГК, участки № 2—4 (п. Сеитовка, п. Степное, п. Комсомольский) относятся к пойменной части. По мнению ряда исследователей [10], это лугово-серые ильменные опустыненные почвы, формирующиеся на террасах ильменей, сложенных песчаным аллювием, имеют легкий механический состав, преимущественно супесчаный. Значительная засоленность почв хлоридами и сульфатами щелочей, гипсом и карбонатами отмечается во внутренних, слабо дренируемых районах. При этом концентрация солей от места к месту не остается неизменной, возрастая на повышенных сухих участках и резко падая в пределах более увлажненных понижений [11]. Поэтому процессы накопления тех или иных концентраций веществ могут протекать по-разному.

Проведена статистическая обработка данных лабораторных исследований содержания в почвах концентраций ионов водорода, основных анионов и катионов, нитратов и подвижной серы. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав веществ в почве (по состоянию на 2020 г.)

Chemical composition of substances in the soil (as of 2020)

Пункт исследований	Глубина, см	pH	Количество вещества (мг/кг)/ПДК (мг/кг)					
			Cl	SO ₄	Ca	Mg	NO ₃	SO ₃
Аксарайский	0–10	8,5–8,8	11/–	506/160	230/–	49/–	53,1/130	200/160
	10–20		32/–	85/160	100/–	50/–	10,1/130	170/160
Комсомольский	0–10	7,9–8,0	41/–	354/160	202/–	29/–	52,1/130	215/160
	10–20		30/–	102/160	161/–	76/–	18,1/130	176/160
Степное	0–10	7,8–7,9	27/–	236/160	250/–	30/–	39,2/130	880/160
	10–20		15/–	120/160	130/–	47/–	15,3/130	626/160
Сеитовка	0–10	8,0–8,2	35/–	480/160	156/–	80/–	34,2/130	250/160
	10–20		28/–	201/160	115/–	20/–	9,1/130	180/160

Примечание: «–» — ПДК не установлено.

Согласно полученным данным, содержание сульфатов изменяется в широких пределах от 85 до 506 мг/кг при ПДК 160 мг/кг. Концентрация нитратов варьирует в среднем от 9,1 до 53,1 мг/кг и не превышает ПДК 130 мг/кг. Концентрация подвижной серы превышена во всех четырех пунктах исследований, изменяется от 170 до 880 мг/кг при ПДК 160 мг/кг.

Такое распределение оксида серы по территории можно объяснить тем, что преимущественный поток воздушных масс представлен юго-восточным переносом и отражается группой суммации. Внутрипочвенное распределение серы,

по-видимому, связано с содержанием органического вещества в горизонтах, поскольку концентрация серы убывает с глубиной.

Выводы

Проведены исследования почвенного покрова территории, прилегающей к санитарно-защитной зоне (СЗЗ) Астраханского газового комплекса (АГК), в районе населенных пунктов (поселки Сеитовка, Степное, Комсомольский). Получены новые данные по состоянию на 2020 г. для пойменных земель, определяющие их сельскохозяйственное назначение. Впервые сопоставлены фактические данные о концентрациях веществ в воздухе и почвах в районе населенных пунктов. На отдельных участках территории установлена устойчивая сульфуризация почв в результате поступления соединений серы в составе выбросов комплекса и переноса с загрязненных участков при ветровой эрозии.

В связи с планируемым вводом новых объектов газового комплекса, учетом преимущественного юго-восточного направления ветров, можно предположить усиление техногенной нагрузки от газовых выбросов источников АГК на западную и юго-западную часть территории, расположенную не только в полупустынной зоне СЗЗ комплекса, но и за ее пределами. Исследования почвенного покрова в непосредственной близости от границ СЗЗ свидетельствуют о неравномерности перераспределения солей в почво-грунтах в зависимости от степени увлажненности различных его частей. При спаде половодья, происходящем лишь к середине лета, относительно повышенные участки, быстро осушаясь, становятся мощными аккумуляторами солей, которые путем бокового капиллярного оттока подтягиваются к ним со стороны промываемых понижений.

Кроме того, в этом районе не исключается осаждение на поверхности почв загрязняющих элементов от объектов комплекса при усилении ветров восточного направления, а также перенос долгоживущих в атмосфере загрязнителей с других регионов. Таким образом, дальнейшие негативные последствия, связанные с промышленным освоением пойменной зоны можно будет минимизировать, при условии соблюдения природоохранных мероприятий и ведения мониторинговых исследований.

Список литературы

1. Кочуров Б. И., Воронин Н. И., Гольчикова Н. Н. Геоэкологическая характеристика Астраханской области. Астрахань: Астрах. гос. техн. ун-т, 2004. 91 с.
2. Токарева А. А., Кутлусурина Г. В., Аронова Ю. В. Роль подземных и поверхностных вод аридной зоны в преобразованиях природных комплексов на примере Астраханской области // Проблемы региональной экологии. 2019. № 1. С. 78—89.
3. Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2021. V. 250. doi: 10.1016/j.ecss.2020.107150.
4. Информационный бюллетень «О состоянии окружающей среды Республики Казахстан» РГП «Казгидромет» Департамента экологического мониторинга Министерства окружающей среды и водных ресурсов. 2013. № 12 (170). 110 с.
5. Bauduin S., Clarisse L., Hadji-Lazaro J., Theys N., Clerbaux C., Coheur P.-F. Retrieval of near-surface sulfur dioxide (SO₂) concentrations at a global scale using IASI satellite observations // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 721—740. doi: 10.5194/amt-9-721-2016.

6. Минашкина А. В., Кондратенко С. В., Воробьёва Е. А. Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 96—112. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112.
7. Минашкина А. В., Кондратенко С. В. Изменчивость химических показателей фильтрационных вод полигона твердых коммунальных отходов в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 558—574. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-558-574.
8. Fioletov V., McLinden C. A., Kharol S. K., Krotkov N. A., Li C., Joiner J., Moran M. D., Vet R., Visschedijk A. J. H., Gon H. V. D. Multi-source SO₂ emissions retrievals and consistency of satellite and surface measurements with reported emissions // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 12 597—12 616. doi: 10.5194/acp-17-12597-2017.
9. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Книга по Требованию, 2013. 489 с.
10. Островская Е. В., Колокольцев С. Н., Колмыков Е. В. Состояние окружающей среды в районе Центрально-Астраханского газоконденсатного месторождения в Волго-Ахтубинской пойме. Астрахань: Типография ИП Малышев М.М., 2015. 231 с.
11. Токарева А. А., Кутлусурина Г. В. К оценке состояния природно-техногенных комплексов Астраханской области в связи с перспективой территориального планирования // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (12). С. 2621—2626.

References

1. Kochurov B. I., Voronin N. I., Golchikova N. N. *Geokologicheskiye xarakteristiki Astraxanskoy oblasti = Geocological characteristics of the Astrakhan region*. Astrakhan : Astrakh. gos. tekhn. un-t, 2004: 91 p. (In Russ.).
2. Tokareva A. A., Kutlusurin G. V., Aronova Y. V. The role of underground and surface waters of the arid zone in the transformations of natural complexes on the example of the Astrakhan region. *Problemy regional'noy ekologii = Problems of regional ecology*. 2019;(1):78—89. (In Russ.).
3. Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021;(250). doi: 10.1016/j.ecss.2020.107150.
4. *Informacionnyy biulleten' o sostoyanii okruzhayemykh sredy Respubliki Kazaxstan = Newsletter "On the state of the Environment of the Republic of Kazakhstan"*. 2013;12(170): 110 p. (In Russ.).
5. Bauduin S., Clarisse L., Hadji-Lazaro J., Theys N., Clerbaux C., Coheur P.-F. Retrieval of near-surface sulfur dioxide (SO₂) concentrations at a global scale using IASI satellite observations // Atmos. Meas. Tech. 2016;(9):721—740. doi: 10.5194/amt-9-721-2016.
6. Minashkina A. V., Kondratenko S. V., Vorobyova E. A. Development of a program for monitoring water bodies near the recultivated MSW landfill in the village named after A. Kosmodemyansky, Kaliningrad region. *Gidrometeorologia i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(62):96—112. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112. (In Russ.).
7. Minashkina A. V., Kondratenko S. V. Variability of chemical parameters of filtration waters of the municipal solid waste landfill in the village named after A. Kosmodemyansky of the Kaliningrad region. *Gidrometeorologia i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(64):558—574. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-558-574. (In Russ.).
8. Fioletov V., McLinden C. A., Kharol S. K., Krotkov N. A., Li C., Joiner J., Moran M. D., Vet R., Visschedijk A. J. H., Gon H. V. D. Multi-source SO₂ emissions retrievals and consistency of satellite and surface measurements with reported emissions. *Atmos. Chem. Phys.* 2017;(17):12 597—12 616. doi: 10.5194/acp-17-12597-2017.
9. Arinushkina E. V. *Rucovodstvo po ximiyeskomu analizu pochv = Manual on chemical analysis of soils*. 2013: 489 p. (In Russ.).
10. Ostrovskaya E. V., Kolokol'tsev S. N., Kolmykov E. V. *Sostoyaniye okruzhayemykh sredy v raione central'no-Astraxanskogo gazokondensatnogo mestorogdeniya v Bolgo-Axtubinskoy poime = The state of the environment in the area of the Central Astrakhan gas condensate field in the Volga-Akh-tuba floodplain*. 2015: 231 p. (In Russ.).

11. Tokareva A. A., Kutlusrina G. V. To assess the state of natural and man-made complexes of the Astrakhan region in connection with the prospect of territorial planning. *Fundamentalnie issledovaniya = Fundamental research*. 2015;2(12):2621—2626. (In Russ.)

Сведения об авторе

Анна Анатольевна Токарева, канд. геогр. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», marga_gamma@mail.ru.

Information about the author

Anna A. Tokareva, PhD (Geogr. Sci), Associate Professor of the Department of “Life Safety and Environmental Engineering”, Astrakhan State Technical University.

Статья поступила 20.07.2022

Принята к публикации после доработки 22.10.2022

The article was received on 20.07.2022

The article was accepted after revision on 22.10.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 722—745.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):722—745.

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

Научная статья

УДК [551.524:551.583](6-191.2)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-722-745

Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке

Магбини Токпа Мами, Владимир Алексеевич Лобанов

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, mtmamy2013@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на 65 метеостанциях Центральной Африки для оценки влияния климатических изменений на динамику средних многолетних значений. В связи с пространственно-временной неоднородностью наблюдений, разработана методика, основанная на последовательном переходе от более надежной к менее надежной информации, на оценке устойчивости показателей нестационарности, на выделении районов однородных по динамике изменений климата и на количественной оценке произошедших изменений. Получены количественные оценки роста температур воздуха в различные сезоны года, которые достигают 2,2—2,4 °C в южных горных и восточных районах во все сезоны и дополнительно в летний муссон в прибрежных районах и в весенний межмуссонный период на севере. В центральной части территории рост средних температур не превышает 0,5—0,6 °C.

Ключевые слова: среднемесячная температура, изменение климата, Центральная Африка, моделирование многолетних рядов, оценки роста температуры.

Для цитирования: Мами М. Т., Лобанов В. А. Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 722—745. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-722-745.

DISCUSSION

Original article

Modern climate changes in the air temperature in Central Africa

Magbini Tokpa Mami, Vladimir A. Lobanov

Russian State Hydrometeorological University, Russia, mtmamy2013@gmail.com

Summary. The article considers long-term time series of average monthly air temperatures at 65 meteorological stations in Central Africa to assess the impact of climate change on the dynamics of average long-term values. This study made it possible to fill in the gaps and eliminate the ambiguity of the results on assessing the impact of modern climate warming in this part of the planet. Due to the spatial-temporal

heterogeneity of observations, a technique has been developed to assess the effectiveness of non-stationary average models when passing from more reliable to less reliable information, as well as to assess the stability of the model parameters and spatial-temporal regularities of the average dynamics. It has been found that changes in the average temperature took place in the second half of the 20th century from the mid-1970s to the early 2000s, with the stepwise mean change model being more efficient than the trend model. It has been established that in all seasons of the year in the southern mountainous and eastern regions of the territory there was the greatest rise in temperatures up to 2.0—2.2 °C, which is 1.7—2.1 of the standard deviation (SD). In the summer monsoon, moist and warm air masses from the Atlantic with increasing SST add the western coastal strip to the area of significant temperature rise up to 1.5—1.7 °C. Another area of significant temperature rise up to 2.2—2.4 °C in the north took place during the hottest spring inter-monsoon period and is apparently associated with the southward advance of the Sahara. In the central part of the territory, where there are tropical forests, the temperature rise in most of the seasons (with the exception of spring) is small and does not exceed 0.5—0.6 °C, which is less than the standard deviation.

Keywords: mean monthly temperature, climate change, Central Africa, simulation of long-term series, estimates of temperature rise

For citation: Mami Magbini Tokpa, Lobanov V. A. Modern climate changes in the air temperature in Central Africa. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):722—745. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-722-745. (In Russ.).

Введение

Изменение климата — одна из основных проблем, с которыми сталкивается человечество в XXI веке [1, 2]. Его воздействие сегодня проявляется во всех секторах государственной и частной деятельности [3]. МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) в 5-ом оценочном докладе утверждает, что глобальное потепление однозначно характеризуется повышением средней температуры атмосферы и океанов [4]. Причем температура воздуха в разных широтах повышается по-разному, и наибольшее повышение температуры наблюдалось в умеренных широтах и на юге Сибири [5]. На основании физико-математических моделей климата при современном потеплении следует ожидать наибольшего прироста температуры в высоких широтах и наименьшего в низких или экваториальных, к которым относится рассматриваемая в данной работе территория Центральной Африки. Вместе с тем в докладах МГЭИК рост температур в экваториальных районах Африки имеет большую неопределенность и составляет от 0,2 до 2 °C, что в основном обусловлено низкой надежностью данных наблюдений [6—10].

Согласно средним сценариям, представленным в 5-ом докладе МГЭИК и подтвержденным различными другими климатическими исследованиями, в этом столетии большие территории Африки потеплеют более чем на 2 °C выше доиндустриального уровня [11, 12]. Ожидается, что повышение температуры в регионах Африки, включая Центральную Африку, будет даже выше, чем повышение среднемировой температуры (на 1,5 и 2 °C), а волны жары будут более частыми и продолжительными. Ожидается, что экстремальные значения температуры в этом регионе будут выше, чем в среднем по планете, причем наиболее интенсивное потепление будет наблюдаться в Сахеле [13—17]. В ряде работ установлено, что деревья в бассейне реки Конго в Центральной Африке теряют свою способность поглощать углекислый газ, что может привести к дополнительному росту температуры [18, 19].

В связи с большой неопределенностью полученных результатов по региону Центральной Африки целью настоящей работы является всесторонняя оценка как качества данных наблюдений, так и оценок изменения температуры в этом регионе статистическими методами и моделями.

Климат Центральной Африки

Центральная Африка — один из пяти регионов этого континента, расположена в основном в бассейне реки Конго. Согласно определению ООН, Центральная Африка включает в себя: Камерун, Центральноафриканскую Республику, Чад, Демократическую Республику Конго (ДРК), Экваториальную Гвинею, Габон, Республику Конго, Сан-Томе и Принсипи. В данной работе рассматривается территория между $13,8^{\circ}$ с.ш. и $14,4^{\circ}$ ю.ш. и между $6,7^{\circ}$ и $33,8^{\circ}$ в.д. (рис. 1). Эта часть африканской межтропической зоны, пересекаемая экватором и граничащая

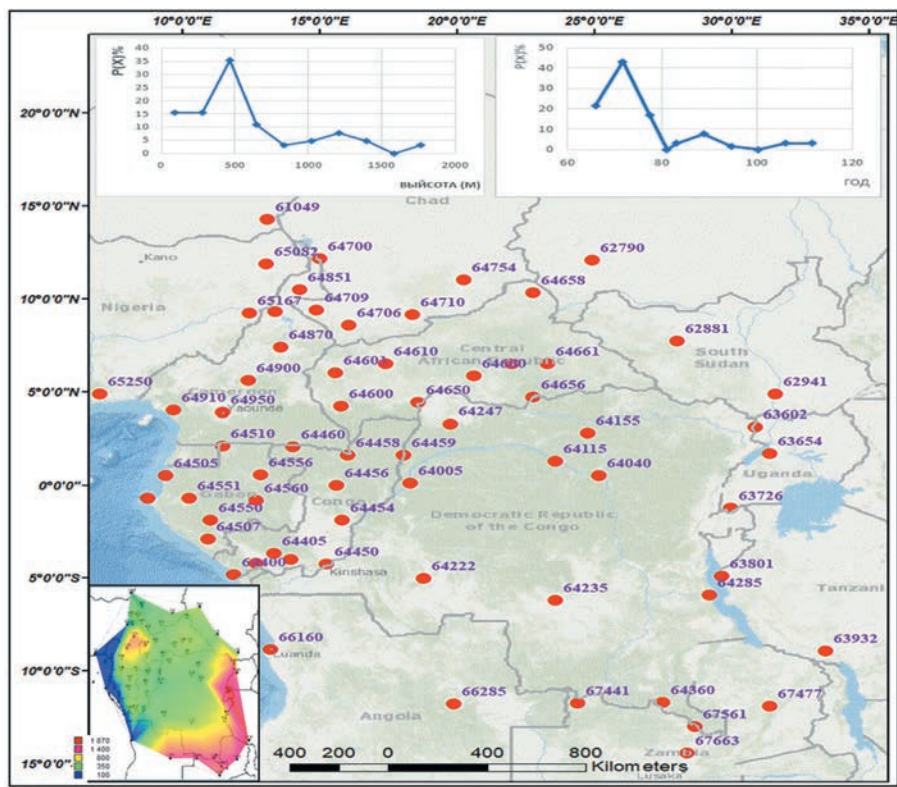


Рис. 1. Схема расположения метеостанций и врезки с распределениями станций по продолжительности рядов наблюдений, по высоте и карта высот.

Fig. 1. The map-scheme of weather stations and with small diagrams the distribution of stations by the duration of the series of observations, by height and a map of altitude of station.

с Атлантическим океаном на западе, имеет жаркий и влажный тропический климат, характеризующийся регулярной и высокой температурой в течение всего года (около $+26^{\circ}\text{C}$ в среднем за год) в сочетании с большим количеством осадков (> 1500 мм/год) [20].

Благодаря своему географическому положению, Центральная Африка отличается разнообразием климатов, которые можно в соответствии с классификацией В. П. Кёппена разделить на: жаркий и влажный экваториальный климат, с температурой от 22 до 30°C с годовым количеством осадков около 1500 — 1800 мм, и тропический суданский, судано-сахельский и сахельский климат [21]. Некоторые регионы со значительной высотой над уровнем моря также подвержены горному климату, особенно вдоль рифта Альберта (к востоку от ДРК) или вдоль Камерунской вулканической линии.

Экваториальный и тропический климат северного полушария характеризуются очень сухим и солнечным основным сезоном (с декабря по февраль), тогда как климат южного полушария, особенно в направлении Атлантического побережья, характеризуется облачным сухим сезоном с очень высокой атмосферной влажностью (с июня по август). Эти климатические различия по обе стороны от климатической петли, разделяющей климаты северного и южного полушарий, оказывают влияние на растительность и имеют значение, которое до сих пор слишком часто упускается из виду в условиях будущего изменения климата [22].

На рис. 2 показаны пространственные распределения многолетних среднемесячных значений температуры воздуха в характерные месяцы четырех сезонов года, полученные по данным метеостанций на рассматриваемой территории за весь период инструментальных наблюдений, который в 80 % случаев составлял 1950—2021 гг. Анализ пространственных изменений температуры в течение года показывает следующие основные ситуации ее динамики. В январе во всем регионе наблюдаются относительно низкие температуры (максимум до 25 — 27°C около Гвинейского залива) с их наименьшими значениями на северо-востоке и в горной юго-восточной части (20 — 22°C) территории по сравнению с центром. Такая ситуация обусловлена влиянием зимней фазы Африканского муссона, в котором прохладный и сухой воздух Северной Африки смещается на юг вслед за движением внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Затем за счет роста поступающей радиации вся территория прогревается, достигая максимальных значений температур в марте-апреле, особенно в северной части (до 32 — 33°C). К лету начинается вторая фаза африканского муссона со смещением ВЗК в Северное полушарие и перемещение вслед за ней влажного атлантического воздуха. Наличие облачности и несколько более прохладного воздуха с океана приводит в общему уменьшению температур, что особенно заметно в западной и юго-западной частях территории около Гвинейского залива, где температуры становятся такими же, как в горной юго-восточной части (20 — 22°C). Осенью в межмуссонный период наблюдается естественный радиационный нагрев территории с максимальными температурами в северной части ближе к Сахели (до 27 — 28°C) и минимальными в горных районах (21 — 22°C). Изменения температур по территории составляют от 7 — 10°C зимой до 12 — 13°C в апреле.

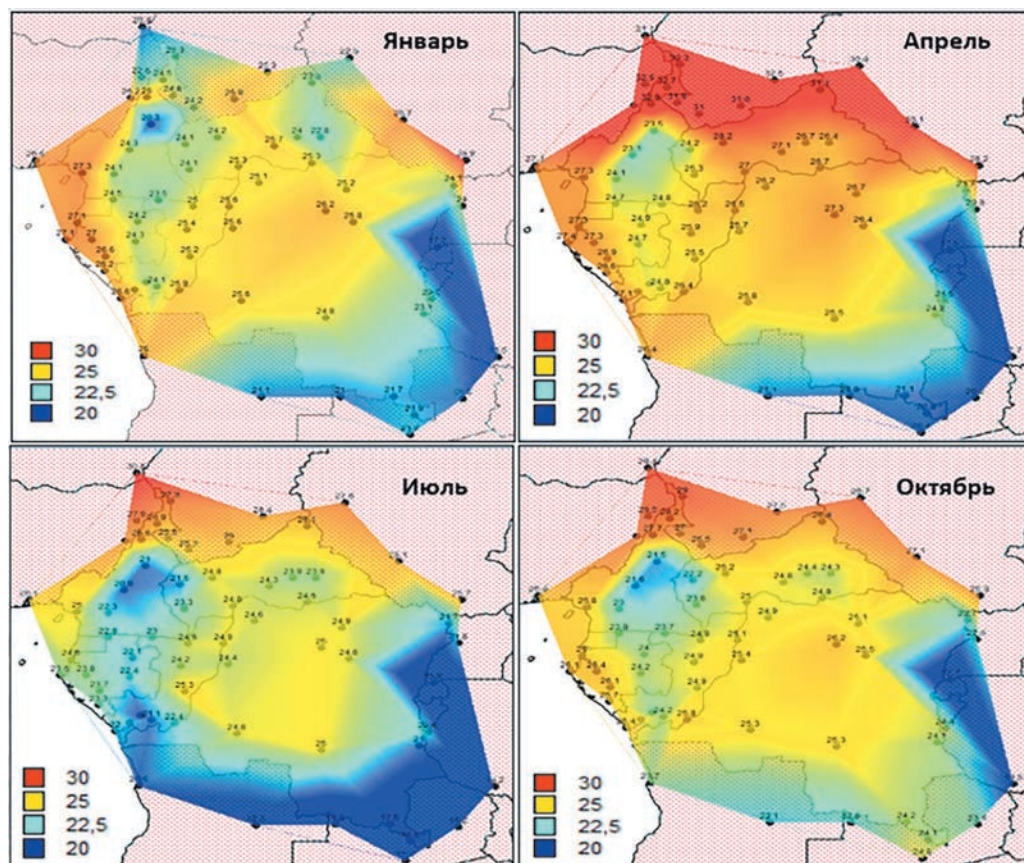


Рис. 2. Пространственные распределения средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года.

Fig. 2. Spatial distribution of average temperatures in the middle months of the seasons.

В целом, следует отметить, что в течение года зима, весна и лето холоднее в горных районах и на морском побережье, а весна и лето теплее на севере, чем в других частях региона. Естественная изменчивость (среднее квадратическое отклонение — СКО) на всей территории менее 1°C , за исключением севера территории (зимой и весной) и юга (летом и осенью), где СКО несколько больше 1°C .

Исходные данные и оценка их качества

Данные, используемые для исследования, представляют собой многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха с начала наблюдений по 2021 г. включительно на 65 метеостанциях, полученные из архивов с сайта метеорологического института Королевства Нидерланды и с сайта «Погода и климат» [23, 24].

Расположение станций с указанием 5-значного кода ВМО показано на рис. 1, на котором в качестве врезок даны также распределения станций по продолжительности наблюдений и по высоте. Как следует из распределения рядов, их продолжительность варьирует от 27 до 113 лет, в среднем составляя 61 год, а высоты метеостанций варьируют от 100 до 1800 м. В целом, распределение станций по территории недостаточно равномерно, и особенно мало пунктов наблюдений в Демократической Республике Конго (9 пунктов), площадь которой составляет практически половину от всей рассматриваемой территории Центральной Африки. На получение более полной информации по отдельным странам Африки влияет также отсутствие доступа к ней, как отмечается, например, в работе [25].

Для формализованной оценки однородности и качества данных были применены статистические критерии Диксона и Смирнова—Граббса для оценки однородности экстремумов эмпирических распределений и статистические критерии Фишера и Стьюдента для оценки стационарности дисперсий и средних значений двух одинаковых частей временного ряда [26—28]. Помимо 65 метеостанций на территории Центральной Африки также была дополнительно оценена однородность рядов температур в 22 ближайших пунктах за ее пределами, имеющих продолжительные ряды наблюдений, которые могут быть привлечены в качестве аналогов при приведении к многолетнему периоду. В результате полученные статистически значимые неоднородные экстремумы при уровне значимости 5 % были исключены из рядов наблюдений. Результаты оценки стационарности на тех же 87 станциях по критериям Фишера и Стьюдента показали, что процент выявленных случаев нестационарности составляет 22,5 %, что свидетельствует о том, что даже при такой предварительной оценке имеются изменения параметров временных рядов. Установлено также, что наиболее неоднородная и некачественная информация существует в Республике Конго, где большая площадь и всего 9 пунктов наблюдений.

В результате пункты наблюдений по качеству информации и продолжительности были разделены на две группы: 30 пунктов с продолжительными и непрерывными рядами наблюдений и остальные пункты, в которых ряды наблюдений непродолжительные, имеются ненадежные и неоднородные данные и пропуски наблюдений. Метеостанции с наиболее продолжительными рядами расположены в основном в восточной и северо-восточной частях исследуемой территории, т. е. в Республике Конго, Габоне, Экваториальной Гвинее, Камеруне и в юго-восточной части Центральноафриканской Республики. По остальной территории (север и запад Центральноафриканской Республики и вся территория Демократической Республики Конго) данных крайне не хватает, или ряды наблюдений не продолжительны и содержат ненадежную информацию.

Для приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду и восстановления пропусков наблюдений применена методика, основанная на построении регрессионных зависимостей за совместный период между короткими рядами наблюдений и более продолжительными в пунктах-аналогах [29, 30]. При этом минимальный совместный период наблюдений был установлен в 10 лет, минимальное количество аналогов в уравнении 3, минимально допустимое значение

коэффициента корреляции $R = 0,85$ для уравнений связи между непродолжительным рядом наблюдений и продолжительными рядами в пунктах-аналогах, среднее отношение коэффициента уравнения регрессии к его средней квадратической ошибке 2,0, что соответствует 95%-ному доверительному интервалу. Полученные результаты представлены в табл. 1, где n — среднее по всем станциям число лет наблюдений, N — среднее число лет после восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов, σ_{ε} — средняя квадратическая погрешность восстановленных значений в $^{\circ}\text{C}$, R — среднее значение коэффициента корреляции уравнений, полученных для восстановления, и m — среднее число пунктов-аналогов, использованных для восстановления.

Таблица 1

Результаты восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов среднемесячных температур на метеостанциях Центральной Африки

The results of restoring gaps and increasing the duration of the time series of monthly temperatures at meteorological stations in Central Africa

Месяц	n	N	σ_{ε}	R	m
1	51	87	0,2	0,94	24
2	51	87	0,3	0,95	25
3	52	84	0,2	0,92	22
4	51	83	0,2	0,93	21
5	51	82	0,2	0,92	23
6	51	84	0,2	0,92	24
7	52	85	0,2	0,93	22
8	52	83	0,2	0,91	23
9	51	83	0,2	0,94	24
10	52	80	0,2	0,93	21
11	51	84	0,2	0,93	24
12	52	86	0,2	0,94	23

Результаты, представленные в табл. 1, свидетельствуют, что показатели приведения к многолетнему периоду достаточно хорошие: количество восстановленных лет в среднем варьирует от 28 в октябре до 36 в январе и феврале, средняя стандартная погрешность восстановленных данных небольшая и составляет всего 0,2—0,3 $^{\circ}\text{C}$, среднее значение коэффициента корреляции высокое — от 0,91 в августе до 0,95 в феврале. В результате средняя продолжительность многолетних рядов температур была доведена до 86—87 лет для зимних месяцев и до 80—85 лет в другие месяцы. Вместе с тем качество восстановления в отдельные годы и на отдельных метеостанциях было не столь высоким, что составляло всего 5 % от общего числа восстановленных данных, как показал повторный анализ однородности и стационарности. Как правило, эта ситуация происходила, когда период наблюдений на станциях был менее 15—20 лет, что характерно для метеостанций на территории Демократической Республики Конго. В итоге некачественные восстановленные данные были исключены.

Методика исследований

Статистическая модель временного ряда

Многолетние колебания климатических характеристик представляют собой композицию или сумму процессов разных временных масштабов. Существует несколько классификаций масштабов изменений климатических характеристик. Наиболее развернутая и детальная — классификация А. С. Монины, где приведены процессы от мелкомасштабных колебаний с периодами секунды — минуты до изменений геологических эпох с периодами десятки и сотни миллионы лет. И недавняя классификация проекта CLIVAR, где на интервале инструментальных наблюдений рассматриваются обобщенные процессы внутригодовой изменчивости, а на межгодовой оси — процессы межгодовой и десятилетней изменчивости и столетних изменений [31].

Для временного интервала инструментальных наблюдений в 100—150 лет число процессов может быть уменьшено до трех — это процессы межгодового, десятилетнего масштабов и часть цикла процесса столетнего масштаба. Вклад этих процессов от тысячелетнего масштаба колебаний и выше будет крайне незначителен:

$$Y_i = Y_{1i} + Y_{2i} + Y_{3i}, \quad (1)$$

где Y_{1i} , Y_{2i} , Y_{3i} — процессы межгодового, десятилетнего и столетнего масштабов.

Существующая модель такого временного ряда, как правило, представляет его в виде следующих составляющих:

$$Y_i = f(t) + \sin(t) \pm \varepsilon_i, \quad (2)$$

где $f(t)$ — регулярная составляющая, которая обусловлена частью процесса столетнего масштаба Y_{3i} ; $\sin(t)$ — гармоническая функция, обусловленная колебаниями процесса десятилетнего масштаба Y_{2i} ; $\pm \varepsilon_i$ — случайная составляющая, обусловленная процессом межгодового масштаба Y_{1i} , обычно связанным с «быстрыми» колебаниями атмосферы.

Если принять, что циклические колебания десятилетнего масштабов также носят случайный характер, то уравнение можно упростить:

$$Y_i = f(t) \pm \varepsilon''_i, \quad (2)$$

где $\pm \varepsilon''_i$ — обобщенная случайная составляющая, обусловленная процессами межгодового и десятилетнего масштабов.

На уровне рассмотрения простых моделей типа (2) проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть в двух вариантах:

- монотонные изменения в виде тренда,
- ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли. Трендовые изменения имеются в слабо инерционной или равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая может компенсировать внешние воздействия и сопротивляться им до тех пор, пока эти воздействия

не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, обычно также квазистационарный, уровень [32, 33]. Фактически этот переход от одних стационарных условий к другим может происходить не за один год, а за несколько лет, и он также представлен в виде тренда между двумя стационарными состояниями.

Эффективность модели (2) проверяется по отношению к базовой стационарной модели, в которой среднее не изменяется во времени.

Оценка эффективности модели

Чтобы оценить, какая модель из трех (стационарная, линейного тренда или ступенчатых изменений) эффективна, необходимо выбрать показатель качества модели. Такими эффективными показателями являются коэффициент детерминации R^2 и обратная ему величина дисперсии (σ_ε^2) или стандартного отклонения (σ_ε) остатков, которые связаны между собой следующим уравнением:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (3)$$

где σ_y — стандартное отклонение ряда наблюдений; σ_ε — стандартное отклонение остатков относительно модели временного ряда.

При аппроксимации временных рядов климатических характеристик во времени не следует ожидать высоких значений R^2 , и поэтому сложно оценить по этому показателю насколько статистически отличаются R^2 одной и другой модели. В качестве показателя эффективности лучше выбрать дисперсию остатков σ_ε^2 , и для оценки статистического отличия этих дисперсий при разных моделях вполне применим известный критерий Фишера.

В качестве базовой или «нулевой» модели следует принять модель стационарной выборки, которая характеризуется неизменностью во времени основных параметров ряда (среднего значения и среднего квадратического отклонения), что выражается условиями:

$$Y_{cp}(t) = \text{const}, \sigma_y(t) = \text{const}. \quad (4)$$

Для стационарной модели стандартное отклонение остатков равно естественной изменчивости — среднему квадратическому отклонению ряда (СКО), т. е. $\sigma_\varepsilon = \sigma_y$, потому что стационарная модель является стохастической и не имеет никакой связанности со временем. Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков определяется по (3), а для модели ступенчатых изменений — как СКО от двух стационарных средних:

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}}, \quad (5)$$

где n_1, n_2 — продолжительности первой и второй стационарных частей ряда.

Год перехода от одного стационарного среднего к другому ($T_{\text{ст}}$) в модели ступенчатых изменений определяется итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1) = \min. \quad (6)$$

При этом следует задать минимальный объем первой части ряда, например, $n_1 = 10$, при котором $n_2 = n - n_1$, и затем последовательно увеличивать n_1 до $m = n - 10$, при котором $n_2 = 10$, т. е. $n_1 = 11, 12, \dots, m$. Иначе эту процедуру можно назвать методом расширяющегося окна [34, 35].

Очевидно, что стандарт остатков модели стационарного среднего должен быть наибольшим или, по крайней мере, равен стандарту остатков нестационарных моделей, если они практически ничего не объясняют. Чем больше разность между стандартами остатков стационарной и нестационарной модели, тем нестационарная модель эффективнее стационарной. В качестве меры отличия можно рассмотреть относительные отклонения Δ в %, рассчитываемые по формуле:

$$\Delta = \frac{(\sigma_Y - \sigma_\varepsilon)}{\sigma_Y} 100 \%. \quad (7)$$

В первом приближении можно принять, что любая нестационарная модель будет эффективнее модели стационарной выборки, если $\Delta \geq 10 \%$, т. е. отличие между моделями гарантированно превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Для оценки статистически значимого отличия остаточных дисперсий стационарной и нестационарной модели можно применить критерий Фишера:

$$F_{TP} = \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_\varepsilon^2}. \quad (8)$$

На основе критических значений статистик Фишера можно определить и критическое значение $\Delta_{кр} \%$, которое получается при подстановке (8) в (7):

$$\Delta_{кр} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{F^*}} \right) 100 \%, \quad (9)$$

где F^* — критическое значение статистики критерия Фишера при уровне значимости α и степенях свободы v_1 и v_2 , где $v_1 = n_1 - 1$ и $v_2 = n_2 - 1$, а n_1, n_2 — объемы выборок.

Принимая, что уровень значимости $\alpha = 5\%$, а временной ряд один и тот же, т. е. $n_1 = n_2 = n$, и для средней продолжительности ряда, равной $n = 61$ год, из таблиц критических значений получим $F^* = 1,53$, а из (9) $\Delta_{кр} = 19,4 \%$. Если же продолжительность ряда равна $n = 31$ год, то $F^* = 1,84$ и $\Delta_{кр} = 26,5 \%$, если $n = 120$, то $F^* = 1,35$ и $\Delta_{кр} = 13,8 \%$, и т.д. Можно также найти, что $\Delta_{кр} = 10 \%$ соответствует $F^* = 1,235$ и n примерно равно 500, т. е. выбранное $\Delta = 10 \%$ соответствует предельному критическому при очень большой продолжительности ряда.

Оценка устойчивости модели

Установленный год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$) применим не только для модели ступенчатых изменений, но и модели тренда, для которой он характеризует изменение скорости тренда или его направления. Фактически этот год позволяет проверить устойчивость вида и параметров модели

во времени. Условие стационарности или нестационарности каждой части ряда до и после $T_{\text{ст}}$ можно проверить с помощью оценки статистической значимости коэффициента корреляции климатической характеристики со временем. При этом возможны следующие варианты:

— коэффициенты корреляции со временем для каждой части ряда (R_1 и R_2) статистически незначимы, и это означает, что временному ряду соответствует модель ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому;

— коэффициенты корреляции со временем для каждой части ряда (R_1 и R_2) статистически значимы, и это означает, что выявленный год $T_{\text{ст}}$ является годом перехода от одной скорости тренда к другой;

— один из коэффициентов корреляции со временем статистически значим, а другой не значим, и это означает, в одной части ряда тренд имеет место, а в другой нет.

Поэтому установленный год $T_{\text{ст}}$ позволяет оценить устойчивость параметров модели временного ряда. При этом нулевая гипотеза об одинаковости типа модели для двух частей временного ряда также может отклоняться, и одна часть ряда может больше соответствовать стационарной модели, а вторая — модели тренда.

Алгоритм реализации методики

Алгоритм данного исследования включает следующие основные пункты.

1. На основе данных 30 пунктов наблюдений, выбранных в качестве наиболее продолжительных с достоверной информацией, осуществляется аппроксимация временных рядов моделями нестационарного среднего и рассчитываются показатели эффективности этих моделей (r — коэффициент корреляции со временем, $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ — отличия от модели стационарной выборки моделей линейного тренда и ступенчатых изменений соответственно) и год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{ст}}$).

2. Оценивается устойчивость показателей эффективности моделей нестационарного среднего (r , $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$) и $T_{\text{ст}}$ во времени путем задания разных лет начала наблюдений (1900, 1920, 1940, 1960, 1980, 2000 гг.) и определяется год наиболее вероятного перехода от одних стационарных или квазистационарных условий к другим ($T_{\text{стр}}$).

3. Устанавливаются предварительные пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей по результатам моделирования данных 30 метеостанций с наиболее надежной и достоверной информацией.

4. Осуществляется моделирование временных рядов на остальных метеостанциях, и новые результаты дополняют и уточняют полученные ранее пространственно-временные закономерности.

5. Выделяются однородные районы с одинаковым видом изменений средних значений во времени и годом этих изменений ($T_{\text{стр}}$), при этом статистическое отличие средних значений двух частей временного ряда ($x_{\text{сп1}}$, $x_{\text{сп2}}$) оценивается по критерию Стьюдента [28].

6. В полученных однородных районах оценивается вид модели до и после $T_{\text{стр}}$ на основе оценки коэффициентов корреляции со временем для каждой части временного ряда (r_1 и r_2).

7. Рассчитывается разность между средними значениями ($\Delta x_{\text{ср}} = x_{\text{ср}2} - x_{\text{ср}1}$) и сопоставляется со средним квадратическим отклонением всего ряда (σ_y), которое характеризует естественную климатическую изменчивость.

8. Устанавливаются пространственные закономерности $\Delta x_{\text{ср}}$ в °С и в долях σ_y .

Результаты и их обсуждение

Полученные закономерности на основе продолжительных рядов

Прежде всего, было проведено моделирование и выполнена оценка устойчивости параметров моделей для 30 наиболее продолжительных рядов с надежными данными наблюдений. Результаты в виде средних значений параметров эффективности нестационарных моделей r , $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ст}}$, а также $T_{\text{ст}}$ приведены в табл. 2 для двух частей продолжительных временных рядов: с начала наблюдений до 1960 г. и с 1961 по 2021 г.

Таблица 2

Результаты оценки устойчивости параметров моделей
для 30 наиболее продолжительных рядов

Results of estimation of stability of model parameters for 30 longest series

Месяцы	$\Delta_{\text{тр}}$		$\Delta_{\text{ст}}$		r		$T_{\text{ст}}$	
	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960
1	7,0	10,0	1,1	13,2	0,06	0,29	1948	1994
2	8,8	10,9	0,8	14,3	0,13	0,35	1946	1995
3	9,9	11,0	1,5	15,1	0,08	0,39	1948	1995
4	8,9	10,6	1,1	14,7	0,13	0,33	1947	1988
5	7,2	10,3	1,3	15,9	0,09	0,33	1947	1987
6	9,2	11,9	0,1	15,7	0,24	0,40	1946	1991
7	7,0	16,6	0,5	20,4	0,18	0,48	1948	1992
8	6,2	13,9	1,0	18,2	0,08	0,41	1946	1991
9	5,7	12,4	0,3	18,0	0,03	0,35	1945	1991
10	7,2	11,0	0,2	17,6	0,04	0,31	1941	1988
11	9,1	13,0	1,1	18,1	0,02	0,38	1945	1994
12	7,8	10,0	1,0	15,2	0,10	0,30	1948	1992

Из данных табл. 2 следует, что показатели нестационарности $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ за период наблюдений до 1960 г. для температуры всех месяцев менее 10 %, а коэффициенты корреляции со временем r статистически незначимы. Поэтому период до 1960 г. можно считать стационарным. Вся нестационарность в рядах температур имеет место после 1960 г., т. е. в последний период времени со второй половины XX века. Показатели нестационарности $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ в среднем для температур всех месяцев года

$> 10\%$ с максимальными значениями $18\text{—}20\%$ в июле—сентябре. При этом во всех случаях $\Delta_{\text{ст}} > \Delta_{\text{тр}}$ (в среднем после 1960 г. $\Delta_{\text{тр}} = 11,8\%$, $\Delta_{\text{ст}} = 16,4\%$), что свидетельствует о большей эффективности нестационарной модели ступенчатых изменений среднего, чем модели линейного тренда при аппроксимации временных рядов. В среднем, год таких ступенчатых переходов от одних стационарных условий к другим относится к концу 1980-х — началу 1990-х. Коэффициенты корреляции r температуры воздуха со временем для всех месяцев статистически незначимы.

Пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей

По наиболее продолжительным рядам наблюдений было установлено, что все изменения имеют место во второй половине XX века и, в среднем, в конце 1980-х — начале 1990-х. Поэтому для моделирования в остальных пунктах рассматривались ряды наблюдений только с 1960 г. В результате были рассчитаны параметры эффективности нестационарных моделей r , $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ст}}$ и годы перехода от одного квазистационарного режима к другому $T_{\text{ст}}$ для всех пунктов наблюдений и для всех среднемесячных температур года. На рис. 3 приведены пространственные распределения коэффициентов корреляции r среднемесячных температур со временем для всех месяцев года, которые позволяют оценить эволюцию областей нестационарных моделей. При продолжительности рядов в 61 года (1961—2021 гг.) статистически значимые r начинаются с $r = 0,32$, и поэтому вторая и третья градации r на рис. 3 будут представлять области моделей нестационарного среднего.

Анализ динамики таких областей нестационарных моделей в течение года позволяет сделать следующие выводы. В период зимнего муссона области нестационарных моделей имеют место по границам территории, занимая примерно 50% от ее общей площади с максимумом нестационарности в феврале на востоке. В межмуссонный жаркий весенний период область нестационарных моделей несколько увеличивается и смещается в восточную часть территории, занимая в апреле половину всей площади от северо-востока до юго-востока. В период летнего муссона, когда влажные теплые воздушные массы поступают с Атлантики, территория нестационарных моделей, особенно в июле и августе, покрывает уже до $2/3$ всей рассматриваемой площади и охватывает также и западные прибрежные районы. Отсюда можно предположить, что рост температуры в прибрежных западных частях связан с повышением температуры в прилегающей акватории Атлантики. Области стационарных моделей локализованы в основном в центральной и северных частях территории. В осенний межмуссонный период область нестационарных моделей постепенно уменьшается и смещается с запада на восток, составляя в октябре всего 36% от всей площади. В целом же, в течение всего года нестационарные модели имеют место в восточной и юго-восточной частях территории и, как правило, в горных районах. Стационарные же модели в течение всего года наблюдаются во внутренних областях экваториальных лесов. Поэтому потепление на всей территории неоднородно, и площадь, занятая нестационарными моделями, варьирует от $1/3$ в октябре до $2/3$ в июле и августе.

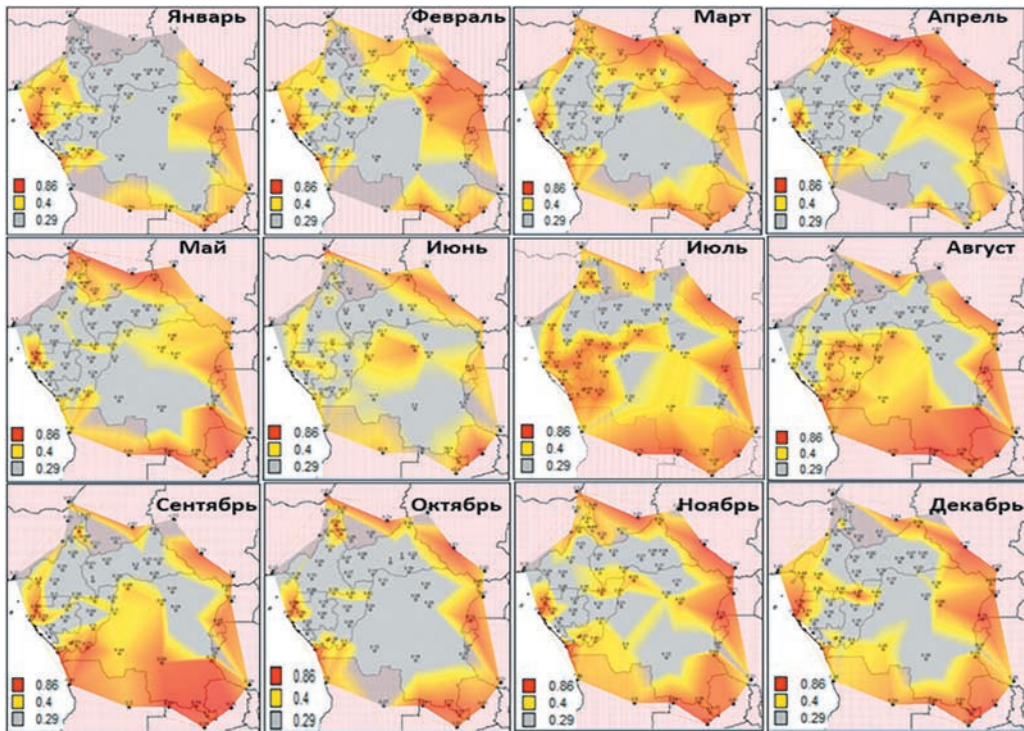


Рис. 3. Пространственные распределения коэффициентов корреляции (r) температуры воздуха со временем в течение года.

Fig. 3. Spatial distributions of correlation coefficients (r) of air temperature over time during the year.

Районирование территории по типу климатических изменений

Поскольку модель ступенчатых изменений средних значений температуры оказалась эффективнее, чем модель тренда, необходимо установить годы ступенчатого роста температур и дать количественную оценку изменений средних значений. Как следует из данных табл. 2, годы ступенчатых изменений могут варьировать в зависимости от месяца и по территории. В качестве примера на рис. 4 приведено пространственное распределение лет перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$) для многолетних рядов температур июля как самого нестационарного месяца (рис. 3). Из рис. 4 видно, что эти годы изменяются в широких пределах: от середины 1970-х до начала 2000-х. Вместе с тем они группируются по территории и позволяют выделить районы однородные по типу изменений климата. Если сопоставить эти районы с областями нестационарности на рис. 3, то для достаточно высоких r в горных южных территориях год перехода относится к началу 2000-х, аналогичные существенные изменения на севере вблизи Сахели относятся к середине-концу 1990-х. Незначительная нестационарность

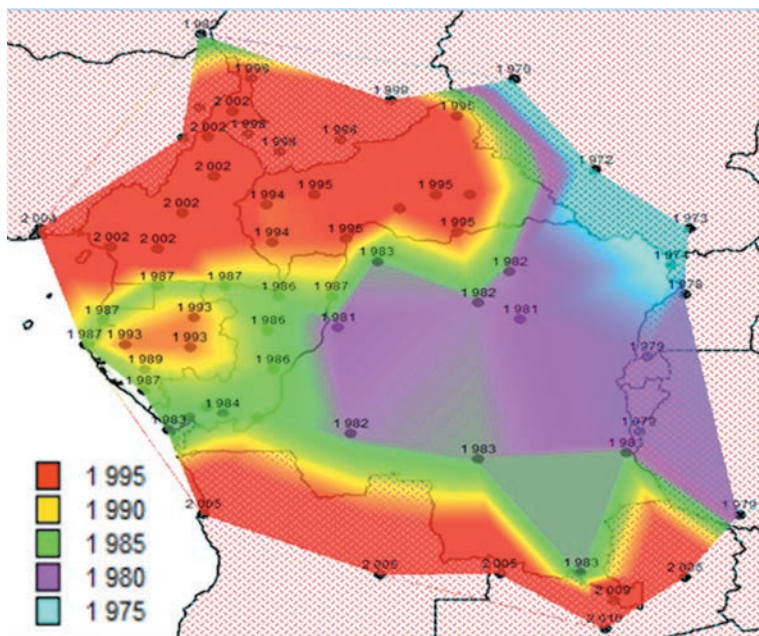


Рис. 4. Пространственное распределение лет перехода от одних стационарных условий к другим.

Fig. 4. Spatial distribution of years of transition from one stationary condition to another.

в центральных областях тропических лесов проявляется в конце 1970-х — начале 1980-х гг. Кроме того, установлено, что в одних случаях во многолетних рядах температур может быть один ступенчатый переход, а в других два.

В качестве дополнительных признаков районирования помимо $T_{ст}$ применялся также радиус корреляции, полученный на основе построенных пространственных корреляционных функций температур воздуха каждого месяца [28, 36]. В результате выделены 4 однородных района по динамике изменений среднего значения температуры воздуха, как показано на рис. 5. Так, в западном прибрежном районе № 1 имеет место одно ступенчатое повышение средней температуры в 2002 г. и среднее изменение $\Delta t_{ср} = 0,7^\circ\text{C}$. В южном горном районе № 2 имеют место два ступенчатых роста температуры в 1984 г. и в 2002 г. и каждый подъем температур составил примерно $0,5^\circ\text{C}$. В районе №3, охватывающем центральную и восточную части территории, также имеют место два прироста средних температур в 1977 и 1997 гг. в сумме составившее $0,7^\circ\text{C}$. В северном районе № 4 наблюдается только одно ступенчатое изменение среднего значения в 1996 г., составляющее $0,7^\circ\text{C}$.

После разработки классификации следует оценить ее эффективность, например, путем расчета и сравнения коэффициентов корреляции между средним рядом в каждом районе и рядами наблюдений во всех метеостанциях рассматриваемой

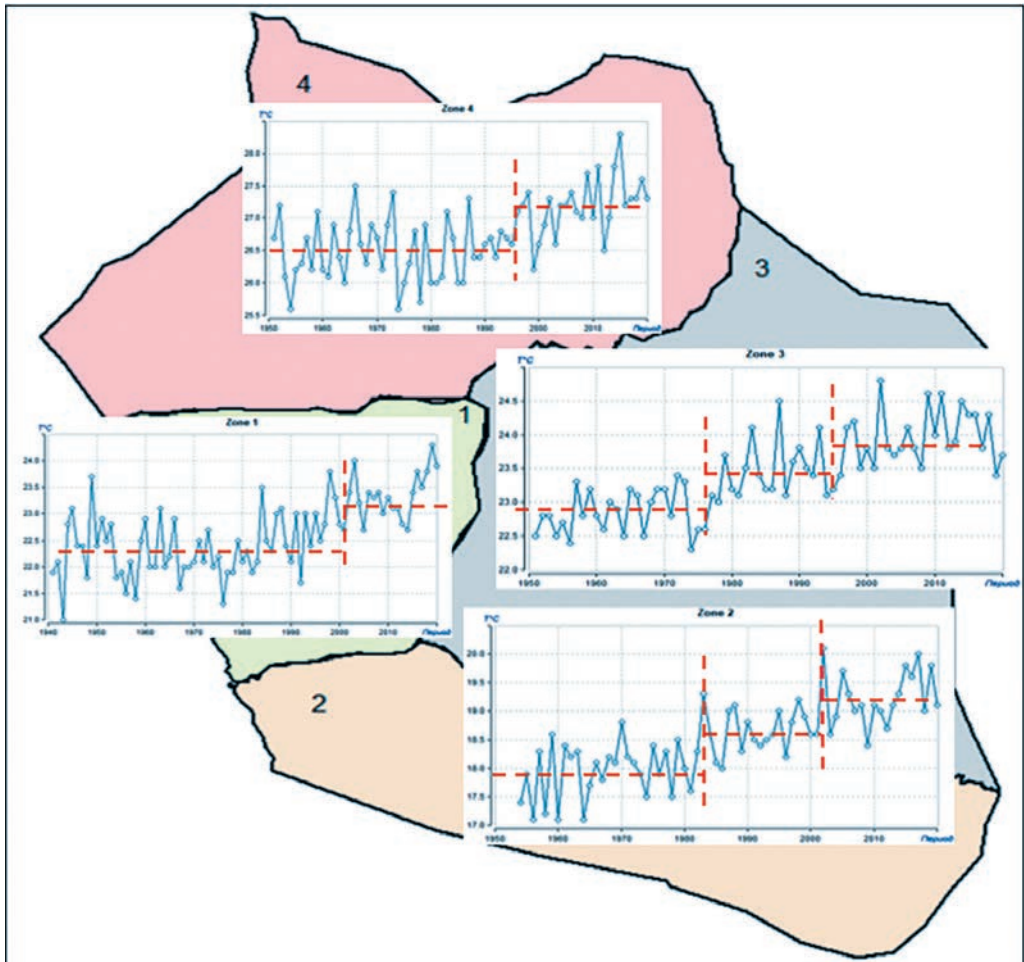


Рис. 5. Изменения средних температур воздуха в однородных районах.

Fig. 5. Changes in average air temperatures in homogeneous areas.

территории [37]. В табл. 3 приведены средние значения коэффициентов парной корреляции $R_{\text{ср}}$ для средних рядов каждого района с многолетними рядами внутри данного района и с многолетними рядами за его пределами. Прочерк в табл. 3 означает, что в данный конкретный месяц в этом районе преобладала модель стационарного среднего.

Как следует из данных табл. 3, $R_{\text{ср}}$ с рядами наблюдений на станциях внутри однородного района обычно больше 0,8, а с рядами за пределами района меньше 0,6—0,5. Так, в среднем за все месяцы в 1-ом районе $R_{\text{ср}} = 0,84$ с рядами внутри района и $R_{\text{ср}} = 0,40$ с рядами за его пределами.

Таблица 3

Средние коэффициенты корреляции между средними рядами в районе и многолетними рядами на метеостанциях внутри и за пределами каждого района

Mean correlation coefficients between average time series in the area and long-term series at weather stations inside and outside each homogeneous region

Месяц	Номера районов							
	1		2		3		4	
	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами
1	—	—	—	—	—	—	0,82	0,36
2	—	—	—	—	—	—	0,83	0,42
3	—	—	—	—	—	—	0,81	0,39
4	—	—	—	—	0,79	0,43	0,83	0,45
5	—	—	0,92	0,40	0,80	0,47	0,86	0,36
6	0,90	0,41	0,87	0,50	0,82	0,39	—	—
7	0,89	0,43	0,90	0,44	0,76	0,44	0,77	0,52
8	0,81	0,44	0,86	0,51	0,85	0,40	—	—
9	—	—	0,83	0,60	0,85	0,44	0,90	0,40
10	—	—	0,80	0,47	—	—	0,79	0,38
11	—	—	0,87	0,41	0,88	0,45	0,83	0,40
12	—	—	—	—	—	—	0,84	0,39

Количественная оценка роста температур

Количественная оценка роста температур основывается на виде модели за каждый период до и после установленного года ступенчатых изменений $T_{ст}$. Если для каждой части временного ряда имеет место модель стационарного среднего, то количественная оценка роста температур определяется как разность средних двух частей временного ряда: $\Delta t_{cp} = t_{cp2} - t_{cp1}$, где t_{cp1} , t_{cp2} — средние температуры первой и второй частей ряда. Если же моделью каждой части временного ряда являются тренды, то для каждого тренда определяется разность расчетных температур в последний и первый год рассматриваемого отрезка временного ряда.

Для оценки стационарности каждой из двух частей временного ряда были рассчитаны коэффициенты корреляции r со временем, которые оказались в подавляющем большинстве случаев статистически незначимы. Поэтому как для средних рядов в однородных районах, так и для каждого ряда температур на метеостанциях были определены Δt_{cp} . Для средних рядов в однородных районах было установлено, что Δt_{cp} изменяется на 0,7 °C зимой, на 1,2 — весной, от 0,8 до 1,0 — летом и от 0,8 до 1,2 — осенью. Однако, существенны эти изменения или нет можно оценить только, если сравнить их с естественной климатической изменчивостью, которая количественно выражается средним квадратическим отклонением (СКО) всего многолетнего ряда. В том случае, если изменения среднего значения превышают СКО, можно считать, что они существенны. В соответствии с правилом трех сигм для нормального закона распределения, двухкратное превышение

СКО соответствует достоверности принятия вывода о статистической значимости полученных изменений с вероятностью 95 %. Если полученные изменения средних значений в районах за разные сезоны года представить в долях СКО, то они будут равны 0,6 зимой, 0,9—1,1 весной, 1,0—1,3 летом и 1,1—1,4 осенью. Таким образом, изменения средних многолетних температур летом и осенью более существенны, чем весной и, тем более, зимой по отношению к их естественной климатической изменчивости.

Конечно, наибольший интерес представляют полученные пространственные изменения как самих $\Delta t_{\text{ср}}$ на станциях, так и по отношению к СКО. Примеры таких пространственных изменений средних многолетних температур приведены на рис. 6 для температур средних месяцев всех сезонов года, а по отношению к СКО — на рис. 7.

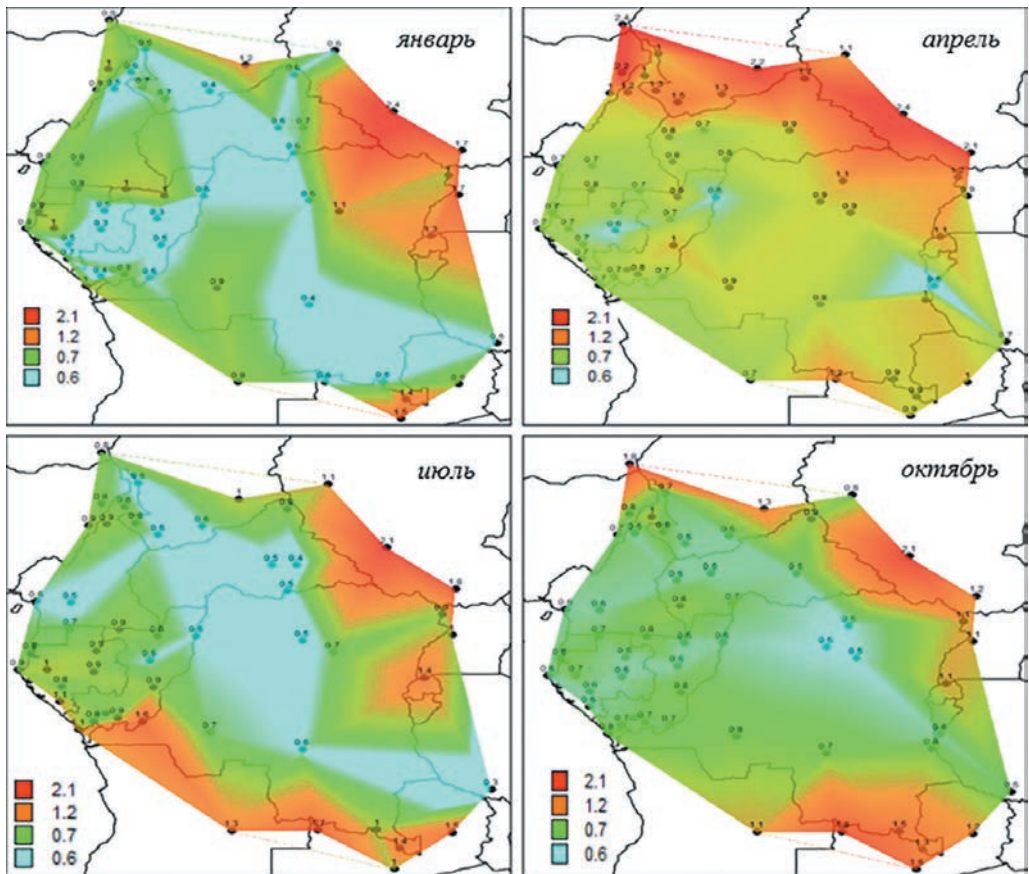


Рис. 6. Пространственные распределения роста средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года.

Fig. 6. Spatial distributions of the growth of average long-term temperatures in the middle months of the seasons of the year.

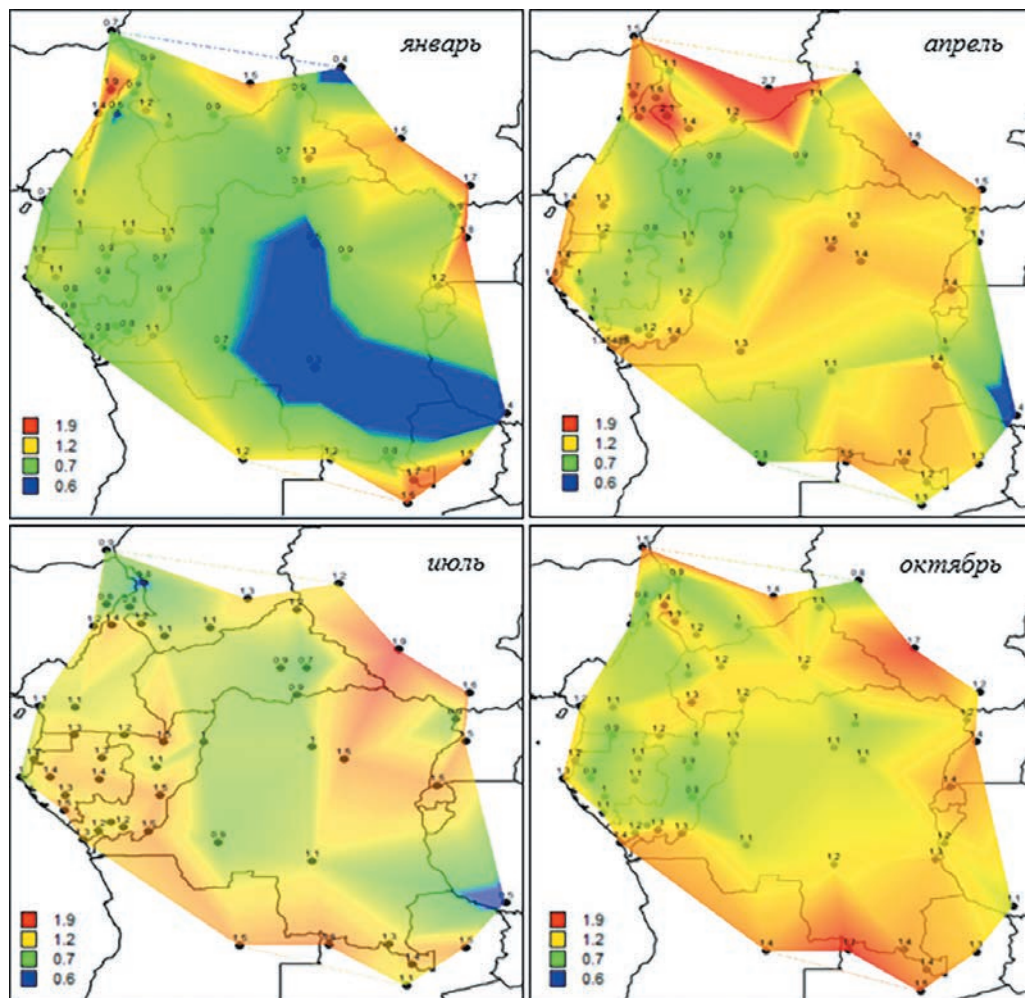


Рис. 7. Пространственные распределения роста средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года в долях СКО.

Fig. 7. Spatial distributions of the growth of average long-term temperatures in the middle months of the seasons of the year in fractions of standard deviations.

Из пространственных распределений $\Delta t_{\text{ср}}$ следует, что в период зимнего муссона (январь) наибольший прирост температур в 1—2 °C имелся на востоке рассматриваемой территории и на юге в горах, наименьшее увеличение температур на 0,5 °C наблюдалось в центральной части, а на севере и в западной прибрежной областях увеличение температуры было 0,6—1,2 °C. В межмуссонный весенний период (апрель) наибольший прирост средних многолетних температур до 2,2—2,4 °C наблюдался на севере и связан с ростом опустынивания и расширением

Сахары и смещением Сахели на юг. На всей остальной территории прирост температур примерно одинаковый и составил от 0,6 до 0,9 °С с несколько большими значениями до 1,2 °С в южной горной части. В период летнего муссона (июль) наибольший рост температур до 1,8—2,2 °С наблюдается на востоке, и еще одна полоса существенного роста температур до 1,0—1,6 °С имеется в южной горной части и в западной прибрежной. В центральной же части тропических лесов прирост составил не более 0,5—0,6 °С. В осенний межмуссонный период (октябрь) наибольшее повышение средней температуры наблюдалось от 1,1 до 2,1 °С на северо-востоке и в южных горных районах. В центральной части повышение также было небольшое — до 0,5—0,6 °С.

Таким образом, во все сезоны годы выделяются две части территории с высоким ростом температур (южные горные и восточные районы) и центральная область тропических лесов, где рост температуры практически всегда (за исключением весеннего жаркого сезона) небольшой. В летний муссон к области высокого прироста температур добавляется также прибрежная территория за счет воздушных масс с центральной Атлантики, где температура поверхности океана (ТПО) увеличивается. А в жаркий весенний межмуссонный период добавляется северная часть, где уже ощущается влияние движущейся с севера Сахары.

Если рассматривать $\Delta t_{\text{ср}}$ по отношению к СКО (рис. 7), то наибольшее превышение СКО от 1,1 до 1,7—2,1 имеется в межмуссонные периоды (весной и осенью) и охватывает до 90 % территории с максимумами также на севере и в горной южной области. В январе в период зимнего муссона многолетняя изменчивость большая, и отношение $\Delta t_{\text{ср}}/\text{СКО}$ достигает максимум 1,7—1,8, причем для половины территории $\Delta t_{\text{ср}}/\text{СКО} < 1$, а в центральной области $< 0,5—0,6$. В июле, в период летнего муссона отношение $\Delta t_{\text{ср}}/\text{СКО}$ примерно одинаково для всей территории и в среднем составляет 1,2—1,3.

Выводы

Выполненное исследование климатических изменений температуры воздуха в Центральной Африке позволило восполнить пробелы и исключить неоднозначность результатов по оценке влияния современного потепления климата в этой части планеты. В частности, получены следующие выводы.

1. Данные наблюдений крайне неоднородны во времени и по пространству, и самые ненадежные наблюдения имеются на территории Демократической Республики Конго, которая занимает почти половину Центральной Африки.

2. Разработана и применена методика оценки климатических изменений температур воздуха в Центральной Африке, основанная на последовательном переходе от более надежной к менее надежной информации, на оценке устойчивости показателей нестационарности, на выделении районов однородных по динамике изменений климата и на количественной оценке произошедших изменений в зависимости от вида модели изменения среднего значения.

3. Установлено, что изменения среднего значения происходили во второй половине XX века в период от середины 1970-х до начала 2000-х, и модель ступенчатых изменений среднего значения более эффективна, чем модель тренда.

4. На территории Центральной Африки выделено 4 района однородных по динамике изменений среднего значения, причем в двух из них ступенчатый подъем температур происходил 2 раза: первый в конце 1970-х — начале 1980-х и второй в конце 1990-х — начале 2000-х, а в остальных двух 1 раз: в середине 1990-х или в начале 2000-х.

5. Во все сезоны года в южных горных и восточных районах территории был наибольший подъем температур до 2,0—2,2 °С, СКО, что составляет 1,7—2,1 СКО. В летний муссон к области высокого роста температур до 1,5—1,7 °С добавляется также прибрежная западная полоса за счет влажных и теплых воздушных масс с Атлантики, где ТПО растет. Еще одна область высокого роста температур на севере до 2,2—2,4 °С имела в наиболее жаркий весенний межмуссонный период и, видимо, связана с продвижением Сахары на юг. В центральной части территории, где тропические леса, прирост температуры практически во все сезоны (за исключением весеннего) небольшой и не превышает 0,5—0,6 °С, что меньше СКО.

Список источников

1. Amraoul L. Caractérisation du tournant climatique des années 1970 en Afrique du Nord-Ouest // Publication IAHS. 2010. Vol. 340. P. 513—520.
2. Vissin E. W. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de Doctorat. Hydro climatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie // CNRS—UMR 5210, version 1 — 11 Feb. 2010. 285 p.
3. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press. 3949 p.
4. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY // USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
5. Второй оценочный доклад РосГидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2018. 1400 с.
6. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat // Secrétariat du GIEC. 2008. Genève. 236 p.
7. Acero F. G., Gracia J. A., Gallego M. C. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. // Journal of Climate. 2011. Vol. 24, № 4. P. 1089—1105.
8. Homar V., Ramis C., Romero R., Alonso S. Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain) // Climatic Change. 2010. Vol. 98. P. 199—211.
9. Amraoui L. Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008) // Thèse de l'Université Jean Moulin — Lyon III. 2011. 43 p.
10. Camberlin P. L'Afrique Centrale dans le contexte de la variabilité climatique tropicale interannuelle et intra saisonnière // HAL Id: hal-00320705. 14 Dec 2010. P. 25—39.
11. Kruger A. C., Shongwe S. Temperature trends in South Africa: 1960—2003 // International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2004. Vol. 24(15). P. 1929—1945.
12. WMO: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://public.wmo.int/en/events/meetings/state-of-climate-africa-2019>. Дата обращения: 17.11.2022.
13. Diedhiou A., Bichet A., Wartenburger R., Seneviratne S.I., David P. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming // Nature. 2018. № 529. P. 477—483.
14. Hulme M., Doherty R., Ngara T., New, M., Lister D. African climate change: 1900—2100 // Climate research. 2001. Vol. 17(2). P. 145—168.

15. Aguilar E., Aziz Barry A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Zhang X. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. 114(D2).
16. Seneviratne S. I., Donat M. G., Pitman A. J., Knutti R., Wilby R. L. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets // *Nature*. 2016. № 540. P. 564—588.
17. IPCC: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter09.pdf. Дата обращения: 17.11.2022.
18. Pokam W., Longandjo G.-N., Moufouma-Okia T., et al. Consequences of 1.5 °C and 2 °C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13, № 5. P. 55—81.
19. Grossman D. The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change. 2020. 49 p.
20. Gond V., Doumenge C. Prospective 2040 des écosystèmes forestiers d'Afrique centrale // *Rapport technique final août*. 2013. 103 p.
21. Köppen W. *Die Klimate der Erde*. Berlin. 1931.
22. Tsalefac M., Hiol Hiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D. J., Scholte P., Doumenge C. Climat de l'Afrique centrale: passé, présent et futur. 2015. P. 37—38.
23. Knmi: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>. Дата обращения: 17.11.2022.
24. Pogodaiklimat: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pogodasiklimat.ru>. Дата обращения: 17.11.2022.
25. Coulibaly H. WG2AR6_FD_Ch09_Final (ipcc.ch) (section 9.5.1.1). 2019.
26. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
27. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
28. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
29. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 64 с.
30. Лобанов В. А., Лемешко Н. А., Жильцова Е. Л., Горлова С. А., Ренева С. А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 5—14.
31. Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
32. Лобанов В. А., Тошакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // *Географический вестник. Пермский университет*. 2016. № 3(38). С. 79—89.
33. Лобанов В. А., Кириллина К. С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография. СПб.: РГГМУ, 2019. 157 с.
34. Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
35. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
36. Лобанов В. А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн. 2. СПб.: РГГМУ, 2018. 377 с.
37. Лобанов В. А. Учебное пособие по региональной климатологии. СПб.: РГГМУ, 2020. 170 с.

References

1. Amraoul L. Caractérisation du tournant climatique des années 1970 en Afrique du Nord-Ouest. Publication IAHS. 2010;(340):513—520.
2. Vissin E. W. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de Doctorat. Hydro climatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie. CNRS—UMR 5210, version 1 — 11 Feb. 2010: 285 p.

3. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: 3949 p.
4. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
5. *Vtoroy otsenochnyy doklad RosGidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* = *The second assessment report of RosHydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Moscow: GU VNIIGMI-WDC, 2018: 1400 p. (In Russ.).
6. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Secrétariat du GIEC. Genève, 2008: 236 p.
7. Acero F. G., Gracia J. A., Gallego M. C. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*. 2011;24(4):1089—1105.
8. Homar V., Ramis C., Romero R., Alonso S. Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain). *Climatic Change*. 2010;(98):199—211.
9. Amraoui L. Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008). Thèse de l'Université Jean Moulin — Lyon III. 2011: 43 p.
10. Camberlin P. L'Afrique Centrale dans le contexte de la variabilité climatique tropicale interannuelle et intra saisonnière. HAL Id: hal-00320705. 14 Dec 2010: 25—39.
11. Kruger A. C., Shongwe S. Temperature trends in South Africa: 1960—2003. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004; 24(15):1929—1945.
12. WMO. Available at: <https://public.wmo.int/en/events/meetings/state-of-climate-africa-2019> (accessed 17.11.2022).
13. Diedhiou A., Bichet A., Wartenburger R., Seneviratne S.I., David P. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5°C and 2°C global warming. *Nature*. 2018;(529):477—483.
14. Hulme M., Doherty R., Ngara T., New, M., Lister D. African climate change: 1900—2100. *Climate research*. 2001;17(2):145—168.
15. Aguilar E., Aziz Barry A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Zhang X. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009:114(D2).
16. Seneviratne S. I., Donat M. G., Pitman A. J., Knutti R., Wilby R. L. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*. 2016;(540):564—588.
17. IPCC. Available at: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter09.pdf (accessed 17.11.2022).
18. Pokam W., Longandjo G-N., Moufouma-Okia T., et al. Consequences of 1.5°C and 2°C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. *Environmental Research Letters*. 2018;13(5):55—81.
19. Grossman D. The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change. 2020: 49 p.
20. Gond V., Doumenge C. Prospective 2040 des écosystèmes forestiers d'Afrique centrale Rapport technique final août. 2013: 103 p.
21. Köppen W. *Die Klimate der Erde*. Berlin. 1931: 118 p.
22. Tsalefac M., Hiol Hiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D. J., Scholte P., Doumenge C. Climat de l'Afrique centrale: passé, présent et futur. 2015:37—38.
23. Knmi. Available at: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone> (accessed 17.11.2022).
24. Pogodaiklimat. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru> (accessed 17.11.2022).
25. Coulibaly H. WG2AR6_FD_Ch09_Final (ipcc.ch) (section 9.5.1.1). 2019.
26. Zaks L. *Statisticheskoye otsenivaniye* = *Statistical estimation*. M.: Statistics. 1976: 598 p. (In Russ.).
27. *Rekomendatsii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vremennykh kolebaniy rechnogo stoka* = *Recommendations on Statistical Methods for Analyzing the Homogeneity of Spatio-Temporal Fluctuations in River Flow*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 78 p. (In Russ.).

28. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii* = *Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. SPb.: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
29. *Rekomendatsii po privedeniyu ryadov rechnogo stoka i ikh parametrov k mnogoletnemu periodu* = *Recommendations for bringing river runoff series and their parameters to a multi-year period*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979: 64 p. (In Russ.).
30. Lobanov V. A., Lemeshko N. A., Zhiltsova E. L., Gorlova S. A., Reneva S. A. Reconstruction of long-term series of air temperature in the European territory of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya* = *Meteorology and Hydrology*. 2005;(2):5—14. (In Russ.).
31. Lobanov V. A., Shadurskiy A. Ye. *Vydeleniye zon klimaticheskogo riska na territorii Rossii pri sovremennoy izmenenii klimata. Monografiya* = *Identification of climatic risk zones on the territory of Russia under current climate change. Monograph*. St. Petersburg: RSHU, 2013: 123 p. (In Russ.).
32. Lobanov V. A., Toshchakova G. G. Features and causes of modern climate change in Russia. *Geograficheskiy vestnik. Permskiy universitet* = *Geographic Bulletin. Perm University*. 2016;3(38):79—89. (In Russ.).
33. Lobanov V. A., Kirilina K. S. *Sovremennyye i budushie izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya). Monografiya* = *Current and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia). Monograph*. St. Petersburg: RSHU, 2019: 157 p. (In Russ.).
34. Shukri O. A. A., Lobanov V. A., Khamid M. S. *Sovremennyyi i budushiy klimat Araviyskogo poluoostrova. Monografiya* = *The current and future climate of the Arabian Peninsula. Monograph*. St. Petersburg: RSHU, 2018: 190 p. (In Russ.).
35. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. *Vliyaniye izmeneniya klimata na ledovyy rezhim Severnogo Kaspiya* = *Influence of climate change on the ice regime of the Northern Caspian*. St. Petersburg: RSHU, 2021: 140 p. (In Russ.).
36. Lobanov V. A. *Lektsii po klimatologii. Chast' 2. Dinamika klimata. Kn.2* = *Lectures on climatology. Part 2. Climate dynamics. Book 2*. St. Petersburg: RSHU, 2018: 377 p. (In Russ.).
37. Lobanov V. A. *Uchebnoye posobiye po regional'noy klimatologii* = *Textbook on regional climatology*. St. Petersburg: RSHU, 2020: 170 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Магбини Токпа Мами, аспирант РГГМУ, (8) 952 360 12 79, mtmamy2013@gmail.com.

Владимир Алексеевич Лобанов, д-р техн. наук, ст. научный сотрудник, проф. кафедры МКОА РГГМУ, (8) 905 259 56 41, lobanov@EL6309.spb.edu.

Information about authors

Magbini Tokpa Mami, post-graduate student of the Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Vladimir A. Lobanov, Dr. of Sci. (Tech.), Senior Scientist, Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 05.05.2022

Принята к публикации после доработки 22.09.2022

The article was received on 05.05.2022

The article was accepted after revision on 22.09.2022

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746—760.

Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69): 746—760.

Научная статья

УДК 551.461.2:[556.12/.16+551.583](262.81)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760

Грозит ли Каспию судьба Арала?

Валерий Николаевич Малинин

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

Аннотация. В статье обсуждаются особенности генезиса колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) в XX в., возможные причины резкого падения уровня в XXI в. и его возможные изменения к концу столетия. Показано, что в XX в. сток Волги на две трети ($R^2 = 0,64$) определял изменчивость уровня Каспия. С начала 1990-х гг. вследствие глобального потепления начался рост испарения с поверхности моря и уменьшение стока Волги, что сказалось на увеличении интенсивности падения уровня с 1996 г. Однако основной причиной его падения является сток вод в залив Кара-Богаз-Гол, дающий вклад 72 %, вклад испарения — 14 %, вклад стока рек — 10 %. Показано, что климатические модели очень плохо описывают даже современный климат Каспия, что указывает их непригодность для прогноза уровня моря на длительную перспективу (конец столетия).

Ключевые слова: Каспийское море, изменения уровня моря, испарение, осадки, климатические модели, прогноз уровня на конец столетия.

Благодарности. Исследование проводилось в рамках проекта «The Caspian Sea Digital Twin», поддержанного МОК ЮНЕСКО и выполняемого в рамках мероприятий, связанных с Десятилетием наук об океане в интересах устойчивого развития (2021—2030 гг.) ООН.

Для цитирования: Малинин В. Н. Грозит ли Каспию судьба Арала? // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746—760. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.

Original article

Does the fate of the Aral Sea threaten the Caspian?

Valerii N. Malinin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, malinin@rshu.ru

Summary. The article discusses the features of the genesis of fluctuations in the level of the Caspian Sea in the 20th century, possible causes of a sharp drop in the level in the 21st century and its possible changes by the end of the century. It is shown that the long-term variability of the Caspian level is an integral indicator of large-scale moisture exchange in the ocean (North Atlantic) — atmosphere — land surface (Volga basin) system. At the same time, in the twentieth century approximately two thirds ($R^2 = 0.64$) of the interannual variability of the level increments are due to the inflow of the Volga River waters. Another third of the level variability is described by effective evaporation ($E-P$). At the same time, the $E-P$ contribution to level changes is mainly concentrated in the white noise range, since the $E-P$ variability is predominantly random. Since the early 90s of the last century, due to global warming, a rapid increase in evaporation from the sea surface and a decrease in the Volga runoff have begun, affecting the increase in the intensity of the level drop since 1996. However, the main reason for its fall is the water runoff into the Kara-Bogaz-Gol

Bay, the contribution of which is 72 %, the contribution of evaporation, river runoff and precipitation being 14 %, 10 % and 4 % respectively. The climate models are shown to describe the modern climate of the Caspian very poorly, which indicates their unsuitability for predicting the Caspian Sea level in the long term (end of the century).

Keywords: Caspian Sea, sea level changes, evaporation, precipitation, climate models, level forecast at the end of the century.

Acknowledgments. The research was conducted in the framework of the “The Caspian Sea Digital Twin” Project endorsed by the IOC UNESCO and performed as part of the activities related to the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021—2030).

For citation: Malinin V. N. Does the fate of the Aral Sea threaten the Caspian? *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69): 746—760. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760. (In Russ.)

Введение

Каспий — уникальный водоем, не имеющий аналогов в мире по биологическому многообразию флоры и фауны. Для населения прибрежных государств экономическое значение Каспийского моря трудно переоценить. Социально-экономическое развитие в прибрежной зоне моря в значительной степени зависит от колебаний его уровня. Из-за бессточности водоема значительные межгодовые колебания уровня Каспийского моря (УКМ), чередование длительных серий его понижения и повышения из-за бессточности водоема приводят к тому, что водная экосистема и экономика прибрежных стран вынуждены приспосабливаться к резко изменяющемуся уровенному режиму. За последние 2000 лет, по данным палеоклиматических реконструкций, размах колебаний уровня мог составить 12 м, при этом его самая низкая отметка отмечалась в середине V в. (–34,5 м), наивысшая — в начале нашей эры (–22,5 м) [1].

В XX столетии размах колебаний уровня составил 3,2 м (рис. 1). Если до 1930 г. отмечался равновесный режим уровня, то в 1930—1978 гг. — резкое падение уровня на 3 м. В 1978—1996 гг. происходит стремительный рост уровня



Рис. 1. Межгодовой ход уровня Каспийского моря по инструментальным наблюдениям (за ноль принята отметка –28 м БС).

Fig. 1. The interannual variation of the Caspian Sea level according to instrumental observations (zero is set to value –28 m of BS).

на 2,4 м. В результате имеем 3 фазы относительно однородных колебаний уровня (стояние, падение, рост), которые названы в 1994 г. естественными климатическими периодами (ЕКП) [2]. По палеоклиматическим данным об уровне за 2000 лет выделены 39 ЕКП, и показано, что их минимальная продолжительность составляет 40 лет. Это послужило основанием считать, что продолжительность ЕКП не менее 40 лет должна остаться и в будущем.

Для последнего периода ЕКП, начавшегося в 1979 г. была предложена аналитическая модель межгодовых колебаний уровня, позволяющая вычислить уровень тяготения с большой заблаговременностью [3]. Исходя из характера колебаний уровня в XX столетии, ЕКП может быть разбит на две существенно различные стадии. Первая представляет собой резкие однонаправленные колебания уровня в начале ЕКП, связанные со скачкообразным изменением составляющих водного баланса и соответственно с переходом на новый уровень тяготения. Вторая стадия состоит в стабилизации уровня в результате действия морфометрического фактора, роль которого быстро нарастает с увеличением продолжительности ЕКП. Это означает приближение реального уровня к равновесному (уровню тяготения), при котором приходная и расходная части водного баланса моря взаимно уравниваются. За конец первой стадии был принят 1995 г. Было показано, что к 2020 г. уровень моря асимптотически приблизится к уровню тяготения и может составить $-26,6 \pm 0,2$ м. Однако прогноз не оправдался, в 2020 г. УКМ достиг отметки -28 м. Причины этого будут указаны ниже.

Особое значение приобретает прогноз реперных лет ЕКП, свидетельствующих о формировании новых длительных тенденций в колебаниях УКМ. Так, переломные годы (1978—79 и 1996—97) в колебаниях уровня современная наука оказалась не в состоянии предсказать. Заметим, что в работе [3] конечный год стадии повышения уровня был определен практически точно (1995 г.). Необходимо также отметить, что выполненный в монографии [4] обзор нескольких десятков методов прогноза УКМ с длительной заблаговременностью свидетельствует о плачевном состоянии проблемы прогноза уровня. Ни один из них не получил полного признания, поэтому мы до настоящего времени не можем уверенно судить о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ.

В данной работе обсуждаются особенности генезиса колебаний УКМ в XX в., возможные причины резкого падения уровня в XXI столетии и его возможные изменения к концу столетия.

Климатическая концепция изменений уровня моря в XX столетии

В общем случае на уровень оказывает большое число разных по своей природе факторов, которые можно свести в четыре большие группы: космогеофизические факторы, геолого-геодинамические процессы, гидрометеорологические процессы, антропогенные факторы. Их подробный анализ в работе [2] показал, что в диапазоне межгодовой изменчивости доминируют климатические процессы, которые обуславливают колебания уровня главным образом через изменения компонент водного баланса.



Рис. 2. Генетическая модель формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря.

Fig. 2. Genetic model of formation of interannual fluctuations of the Caspian Sea level.

Подробный анализ гидрологической системы «Каспийское море», под которой понимается собственно море, его водосборный бассейн и атмосфера над морем и бассейном, позволил выявить всю цепочку причинно-следственных связей от изменений уровня моря до процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в виде трех ветвей: наземной, атмосферной и океанической [2, 5, 6]. В результате была сформулирована климатическая концепция, согласно которой долгопериодная изменчивость уровня Каспия представляет собой интегральный индикатор крупномасштабного влагообмена в системе океан (Северная Атлантика) — атмосфера — поверхность суши (бассейн Волги). Суть этой концепции представлена в виде блок-схемы на рис. 2. При усилении процессов циклонической активности в Северной Атлантике и, прежде всего, в области Исландской депрессии увеличивается испарение, влагосодержание атмосферы. Одновременно с этим повышается зональная составляющая скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующая количество переносимого водяного пара в системе средней циркуляции и крупномасштабных синоптических вихрей.

При росте циклонической активности происходит углубление Исландского минимума давления и его пространственные миграции. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность Североатлантического колебания (САК), которое в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции)

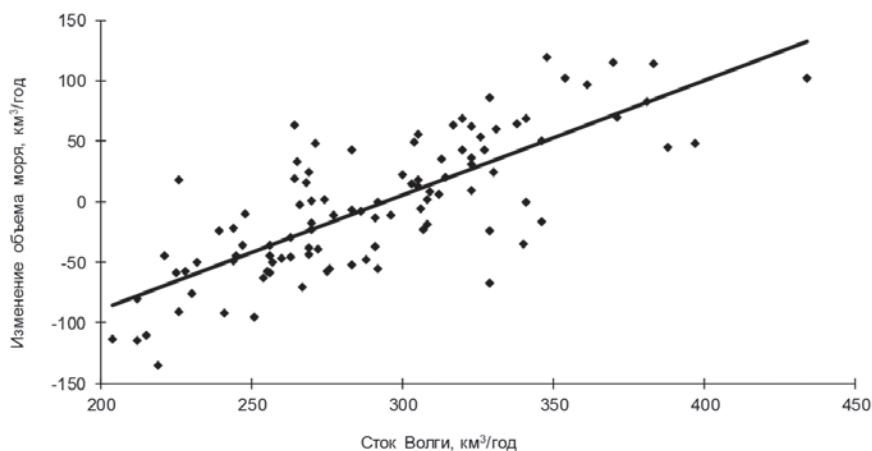


Рис. 3. Диаграмма рассеяния внутригодовых изменений объема Каспийского моря ($\text{км}^3/\text{год}$) в зависимости от годового стока Волги в г. Самара ($\text{км}^3/\text{год}$) за период с 1890 по 1990 г.

Fig. 3. Ratio of intra-annual changes in the Caspian Sea volume (km^3/year) to the annual Volga runoff in Samara (km^3/year) for the period 1890—1990.

зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Это должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на европейский континент и европейскую территорию России и как следствие к увеличению количества осадков на территории бассейна Волги.

При повышении годового стока Волги происходит увеличение внутригодовых приращений объема моря, а значит рост УКМ (рис. 3). Из рис. 3 следует, что в XX в. примерно две трети ($R^2 = 0,64$) межгодовой изменчивости приращений уровня обусловлены притоком речных вод, сформированным в лесной зоне бассейна Волги, находящимся за тысячу км от моря. Другая треть изменчивости уровня описывается эффективным испарением ($E-P$). При этом вклад $E-P$ в изменения уровня в основном сконцентрирован в области белого шума, поскольку изменчивость $E-P$ носила преимущественно случайный характер. Поэтому при описании межгодовых колебаний уровня им можно было пренебречь.

Климат Каспийского моря в XXI столетии

В связи с интенсивным глобальным потеплением климатическая ситуация в Каспийском регионе начала быстро меняться с конца XX века. Повышается температура воздуха и поверхности моря, уменьшается площадь ледяного покрова, увеличивается испарение, уменьшается приток речных вод и количество осадков, выпадающих на акваторию моря [7—11]. Однако происходит это не одновременно

и разными темпами. Согласно работе [7] среднегодовая приповерхностная температура воздуха в Каспийском регионе (море и прилегающие районы) почти монотонно повышалась в течение 41-летнего периода (1980—2020 гг.) со скоростью 0,030 °C, т. е. повышение составило 1,2 °C. Еще выше оказалось потепление температуры поверхности моря (на 1,4 °C).

В течение 1978—1990 г. приток речных вод Волги в Каспий был существенно выше нормы, что явилось одной из важнейших причин роста УКМ. Однако в 90-е годы началась маловодная фаза в увлажнении бассейна Волги, в значительной степени обусловленная ростом засушливых условий в летний период. В результате с 1992 г. отмечается значительный отрицательный тренд волжского стока со скоростью за 24-летний период (1992—2016 гг.) примерно $-2,5 \text{ км}^3/\text{год}$, что соответствует уменьшению слоя воды — 0,64 см/год [8]. Можно напомнить катастрофическую летнюю засуху на европейской территории России в 2010 г., вследствие которой сток Волги резко упал в последующие два года.

Осадки, выпадающие на поверхность моря, меняются значительно меньше по сравнению с речным притоком и испарением. Так, за 15-летний период 2003—2017 гг. среднегодовое количество осадков уменьшилось примерно на 38 мм, что эквивалентно уменьшению уровня Каспия примерно на 4 см, что составляет уменьшение осадков со скоростью 2,6 мм/год [8].

Для оценки скорости падения УКМ не обязательно использовать тренды в уровнеобразующих факторах. В работе [9] рассчитаны средние оценки испарения, осадков и стока речных вод за периоды роста уровня (1979—1995 гг.) и его уменьшения (1966—2015 гг.). Разность в средних оценках за указанные периоды времени дают возможность оценить роль каждого из этих факторов в изменениях уровня. На рис. 4 приводится временной ход испарения, осадков и стока Волги за период 1979—2015 гг. Нетрудно видеть, что все эти компоненты с 1996 г. действуют в одном направлении — усиливают падение уровня моря. При этом наибольший вклад в падение уровня дает испарение. Разность в испарении между 1979—1995 гг. и 1966—2015 гг. составила 10 см.

В табл. 1 представлены оценки компонент водного баланса в сопоставлении с фактическими значениями УКМ за рассматриваемые промежутки времени. Из этой таблицы следует, что наблюдается полное соответствие суммарного водного бюджета ($P - E + Q^*$) как в период роста УКМ, так и в период падения. Авторы отмечают, что именно *увеличение скорости испарения над Каспийским морем в течение 37-летнего периода сыграло доминирующую роль в изменении тенденций УКМ и привело к его текущему снижению*, превышающему влияние изменений притока реки Волги. При этом даже при современном уровне испарения северная часть Каспийского моря может полностью исчезнуть за 75 лет. По мнению авторов, превосходное соответствие между наблюдаемыми и вычисленными значениями УКМ обусловлено использованием для расчета среднемесячных значений испарения и осадков над морем климатической модели Climate Forecast System (CFS), которая представляет собой полностью связанную климатическую модель, включающую компоненты атмосферы, океана, морского льда и суши, и охватывает период с 1979 г. по настоящее время [12].

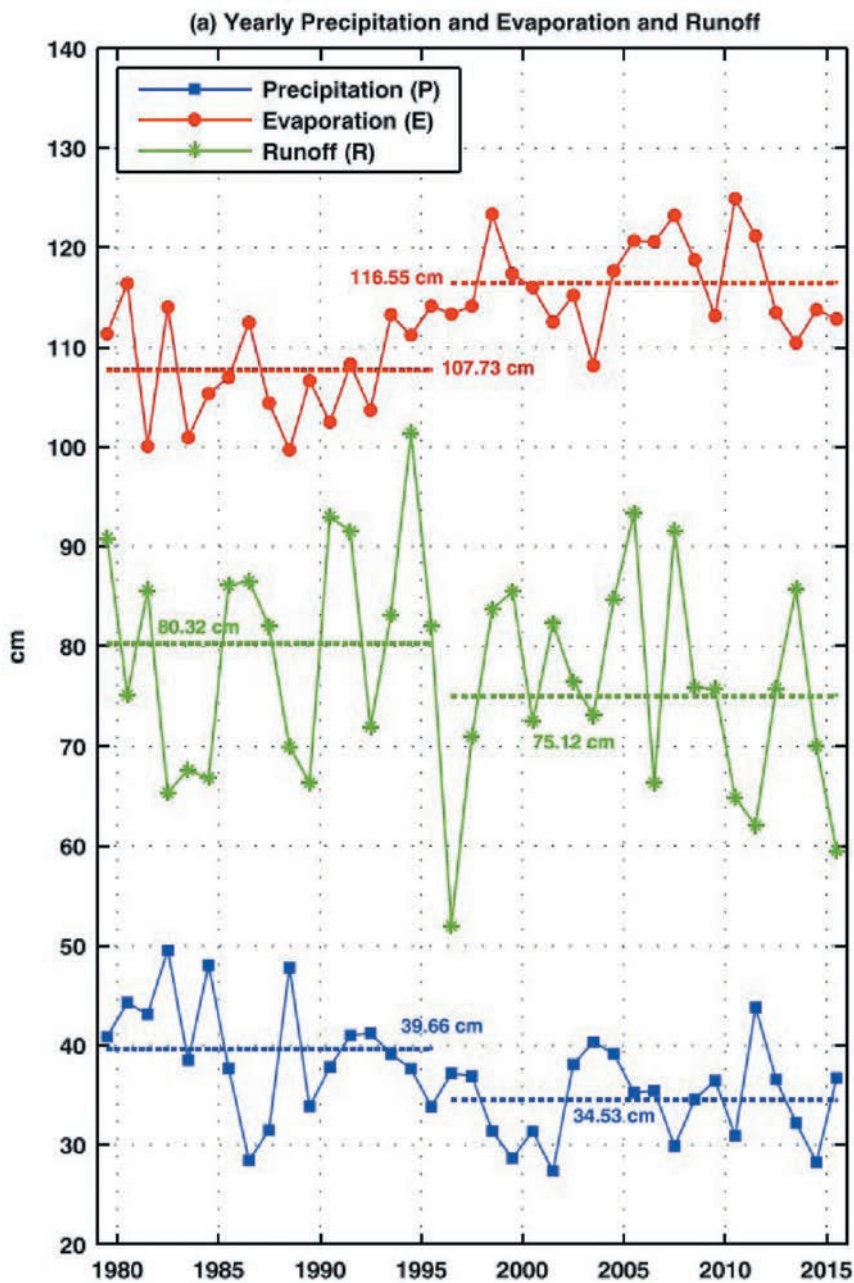


Рис. 4. Межгодовая изменчивость испарения (E), осадков (P) и суммарного притока речных вод к Каспию (R) за период 1980—2015 гг. [9].

Fig. 4. Interannual variability of evaporation (E), precipitation (P) and total inflow of river waters to the Caspian Sea (R) for the period 1980—2015 [9].

Таблица 1

Средние темпы изменения уровня Каспийского моря за периоды 1979—1995 и 1996—2015 гг. с оценками вкладов среднегодового количества осадков (P), испарения (E), речного стока (Q) по данным работы [9]

Average rate of change in the level of the Caspian Sea for the periods 1979—1995 and 1996—2015 with estimates of the contributions of the average annual precipitation (P), evaporation (E), river runoff (Q) according to the data of [9]

Характеристика	1979—1995 гг., см/год	1996—2015 гг., см/год
Уровень моря	12,74	–6,72
Испарение (E)	107,73	116,55
Осадки (P)	39,66	34,53
Волжский сток (Q)	74,02	65,23
Общий сток (Q^*)	80,32	75,12
$P - E + Q$	12,25	–6,90
$P - E + Q^*$	12,38	–6,79

Отметим, что в табл. 1 пропущена компонента водного баланса, представляющая собой сток каспийских вод в залив Кара-Богаз-Гол (КБГ). Авторы поместили ее в разряд «неопределенностей» расчетов, объяснив, что «количественная оценка потенциального вклада оттока в залив КБГ в долгосрочное изменение УКМ затруднена». В действительности достаточно надежные годовые оценки стока в з. КБГ могут быть получены при использовании простой нелинейной зависимости от среднегодового уровня моря [4]. При полном разрушении дамбы в 1992 г. поперечное сечение пролива увеличилось примерно в два раза [13]. Огромный поток каспийских вод устремился в залив. Через несколько лет сток в з. КБГ пришел в равновесие с уровнем моря. По данным [4], сток за период 1996—2012 гг. составил $19,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (5,0 см слоя моря). Можно легко досчитать сток за 2013—2015 гг. Получим, что годовой сток за период 1996—2015 гг. равен $18,9 \text{ км}^3/\text{год}$ или 4,85 см слоя моря. Отсюда вклад стока в з. КБГ в падение УКМ достигает 72 %. Только 28 % приходится на все остальные компоненты водного баланса. Отсюда следует, что именно **полное разрушение дамбы в 1992 г. стало главной причиной сильного падения уровня моря после 1996 г.**, а не рост испарения. С учетом оценок вклада в падение уровня речного стока и осадков (0,64 и 0,26 см/год), получаем, что вклад испарения должен составлять $1,87 - 0,90 = 1,00 \text{ см/год}$ или 14,4 %. На вклад речного стока приходится 9,5 %. Таким образом, о доминирующей роли испарения в падении УКМ [9] не может быть и речи.

Роль испарения состоит в том, что в определенный момент времени за счет уменьшения Q^* оно превысило сумму притока речных вод и осадков и сформировало отрицательный тренд в $P - E + Q^*$, продолжительность которого трудно оценить. По сути, приведенные в табл. 1 результаты расчетов свидетельствуют о значительных систематических ошибках компонент водного баланса, причем суммарная ошибка по отношению к наблюдаемому уровню моря превышает 70 %. На наш взгляд, это вызвано, прежде всего, систематическими ошибками в оценках испарения и осадков по модели CFS. В значительной степени они обусловлены

отсутствием сопоставления с фактическими значениями испарения и осадков на морских станциях и постах в акватории моря.

Вследствие исключительной специфики физико-географических, климатических, гидрологических и иных условий Каспийского моря современные климатические модели до сих пор не в состоянии адекватно описать не только различные процессы на его акватории, но даже пространственное распределение такой характеристики как температура воздуха [10].

В работе [10] было отобрано 10 лучших климатических моделей из проекта CMIP5, температура воздуха из которых сравнивалась за зимний сезон 1960—2004 гг. с аналогичными эмпирическими данными для 8 морских станций на Каспии (табл. 2). Основной вывод из результатов табл. 2 состоит в том, что все модели систематически завышают среднюю температуру воздуха от 3 до почти 12 °С, превышая, иногда в несколько раз, естественную изменчивость, которая в среднем равна 3,2 °С. Кроме того, можно отметить, что коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными по моделям временными рядами среднемесячных температур были очень низкими и даже статистически незначимыми. По сути модели климата не могут воспроизводить фактическую межгодовую изменчивость температуры воздуха, а возможно и компонент водного баланса моря.

Таблица 2

Разности между рассчитанными по моделям температурой воздуха и среднелетними фактическими значениями за зимний сезон 1960—2005 гг. для станций Северного и Среднего Каспия [10]

Differences between model temperature and the average long-term observed of the winter season for 1960—2005 on stations of the North and Middle Caspian [10]

Модель	Номер метеостанции							
	1	2	3	4	5	6	7	8
BCC	7,6	6,2	5,0	5,4	4,9	5,5	5,3	6,6
CanESM2	11,0	9,0	8,4	8,6	7,5	8,7	7,8	8,7
CCSM	9,8	8,4	7,2	7,4	7,7	7,5	8,1	9,8
CNRM	6,7	4,1	4,1	5,0	5,5	5,0	5,9	8,0
CSIRO	8,4	5,4	5,8	7,2	6,1	7,2	6,4	6,5
Hadley	5,7	4,4	3,1	4,9	6,3	4,9	6,6	9,3
INM	6,8	5,2	4,2	4,9	5,9	4,9	6,3	7,3
MPI	7,7	6,5	5,1	5,5	6,9	5,6	7,1	9,3
MIROC	11,9	10,3	9,3	8,8	6,9	8,9	7,3	7,3
IPSL	8,2	6,1	5,6	5,5	4,8	5,6	5,1	6,6
CKO	3,8	4,0	3,4	3,0	2,5	3,1	2,9	3,0

Примечание: 1 — Пешной, 2 — Атырау, 3 — Астрахань, 4 — Лагань, 5 — о. Тюлений, 6 — о. Кулалы, 7 — Форт-Шевченко, 8 — Актау.

О прогнозе уровня Каспия на перспективу

Выше уже говорилось о крайне неудовлетворительном состоянии прогнозов УКМ на перспективу, особенно о смене тенденций длительного роста (падения)

уровня. Сначала нынешнего столетия все большее распространение для оценивания уровня на перспективу получают климатические модели, причем их авторы, особенно не задумываясь, рассчитывают уровень на конец столетия. Известно, что современным климатическим моделям свойственны значительные неопределенности, причем они накапливаются с увеличением расчетного промежутка и могут превысить все разумные рамки.

Укажем ряд моделей, в которых дается прогноз УКМ на конец XXI века по различным моделям [14—18 и др.]. Все они, исключая работу [18], дают сильное снижение уровня, но наиболее широкую известность получила работа [14], очевидно, вследствие экстремальности полученных результатов. В данной работе на основе модели CESM1.2.2 рассматриваются основные режимы зимней изменчивости климата в Северной Атлантике и атмосферные дальние связи, которые потенциально влияют на гидроклимат Каспийского водосборного региона. По модельным данным получен слабо положительный коэффициент корреляции ($r = 0,2$) между зимним водным бюджетом водосбора (осадки минус испарение) и САК для исторического периода 1850—2000. Было принято, что САК остается ведущим режимом зимней изменчивости с доминирующим влиянием на климат в Каспийском водосборном регионе. В соответствии со сценарием RCP4.5 корреляция между зимним NAO и зимним $P-E$ над водосборным бассейном Каспийского моря увеличивается ($r = 0,5$). Однако для RCP8.5 эта корреляция исчезает из-за дипольной модели север—юг с положительной аномалией $P-E$ над северными и отрицательной аномалией над южными частями водосборного бассейна Каспийского моря, что сводит на нет влияние на общий водный бюджет Каспия. Тем не менее из-за увеличения ежегодного испарения над Каспийским морем в условиях потепления климата модель прогнозирует дополнительное снижение УКМ примерно на 9 и 18 м между 2020 и 2100 гг. для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно, причем общая площадь Каспия сократится на четверть (рис. 5). В результате произойдет грандиозная социально-экономическая и экологическая катастрофа, которая по своему масштабу может превзойти катастрофу Арала.

Впрочем, подобный прогноз является скорее фантастическим, чем научным. Действительно, главный базис, т. е. на чем строится модель — это коэффициент корреляции, равный 0,2 между зимним водным бюджетом водосбора (осадки минус испарение) и САК. Вряд ли к такому «базису» можно относиться серьезно, скорее, только с улыбкой. Использование в виде основы прогноза зимнего бюджета волжского бассейна также вызывает серьезные возражения, поскольку летнее увлажнение вносит существенный вклад в формирование годового стока Волги. Очевидно, другие предположения уже нет необходимости комментировать. Что касается других моделей, ориентированных на прогноз уровня, то в них тоже делаются плохо обусловленные предположения относительно межгодовой изменчивости компонент водного баланса. При интегрировании моделей на длительный срок происходит накопление ошибок, вследствие чего полученные результаты становятся крайне ненадежными.

В принципе, даже без использования сложных климатических моделей можно высказать соображения, когда может произойти стабилизация колебаний УКМ.

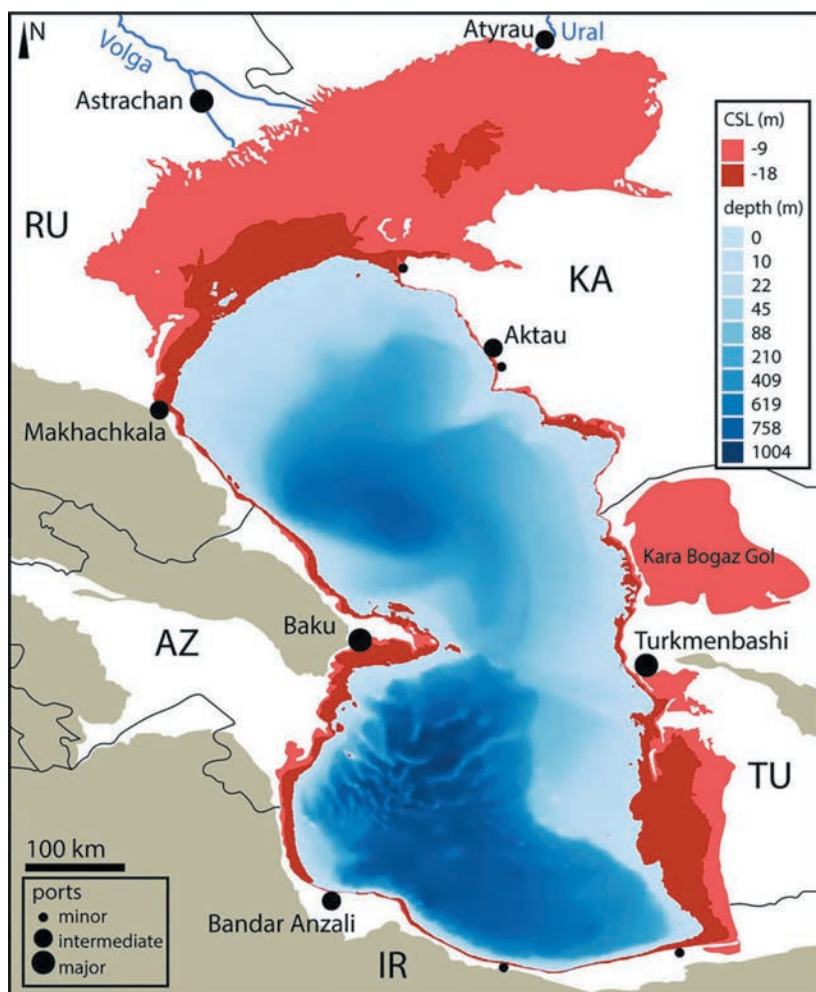


Рис. 5. Изменения уровня Каспийского моря на конец столетия для климатических сценариев RCP4.5 и RCP8.5 [14].

Fig. 5. Changes in the level of the Caspian Sea at the end of the century for climate scenarios RCP4.5 and RCP8.5 [14].

Согласно [4] отметка дна пролива КБГ составляет $-30,6$ м БС, поскольку при таком уровне моря сток в залив прекращается. Учет также действие морфометрического фактора, в соответствии с которым существует отрицательная обратная связь уровня с испарением с его поверхности [13]. С уменьшением уровня и соответственно площади моря происходит сокращение объема испарившейся воды, что в свою очередь способствует сокращению падения уровня. Поскольку испарение в последнее десятилетие уже начало снижаться [9], то не исключено, что это

может быть связано с действием морфометрического фактора. Поэтому вполне вероятно, что отметка уровня -31 м БС является уже уровнем тяготения, ниже которого УКМ вряд ли опустится ниже при современных климатических условиях.

Заключение

Показано, что основной причиной быстрого снижения УКМ с 1996 г. является не интенсивный рост испарения с поверхности моря, а годовой сток каспийских вод в залив КБГ в результате полного разрушения дамбы в 1992 г., который за период 1996—2015 гг. составлял $18,9 \text{ км}^3/\text{год}$ или $4,85$ см слоя моря. Отсюда вклад стока в з. КБГ в падение УКМ достигает 72 %. Только 28 % приходится на все остальные компоненты водного баланса. При этом вклад испарения примерно $1,00$ см/год или 14,4 %. На вклад речного стока приходится 9,5 %. Оставшиеся 4 % — вклад осадков. Роль испарения состоит в том, что в определенный момент времени за счет уменьшения Q^* оно превысило сумму притока речных вод и осадков и сформировало отрицательный тренд в $P - E + Q^*$, возможная продолжительность которого не поддается оценке. Как уже было отмечено выше, природа длительности долговременных однонаправленных колебаний уровня (естественных климатических периодов) до настоящего времени не выявлена и не поддается реальному прогнозу.

В настоящее время УКМ находится примерно на отметке $-28,5$ м. Есть основания полагать, что в ближайшие годы уровень может опуститься ниже 29 м! Это означает катастрофу для рыбного промысла, поскольку произойдет осушение нерестилищ ценных пород рыбы в северной части моря. В Советском Союзе этой проблемой занимались на государственном уровне. Так, в 1960—70-е гг. перед явной угрозой снижения уровня ниже 29 м была разработана комплексная государственная Программа переброски стока ряда северных рек в Волгу, что позволило бы стабилизировать уровень Каспия. В конце 70-х Программа была принята Советом Министров, и началась ее реализация. К 1983 г. была уже освоена гигантская по тем временам сумма — около 3 млрд руб. В 1986 г. в связи с устойчивым ростом уровня Программа была закрыта. А что сейчас? Похоже, государственные органы данная проблема не волнует. Или в Каспийском море уже не осталось осетровых? Не выделяются деньги даже на научные программы комплексных исследований Каспийского моря. В результате через несколько лет мы можем оказаться у разбитого корыта. Уровень катастрофически снизится, а мы не будем знать, как с этим бороться. При дальнейшем падении уровня начнется осолонение вод моря, вследствие чего его водная экосистема будет угнетаться, и неизвестно, сможет ли она приспособиться к новым быстро изменяющимся экологическим условиям.

Вследствие возможного падения уровня ниже отметки 29 м и в связи с этим огромным экономическим ущербом для прикаспийских стран проблема прогноза уровня на перспективу приобретает стратегическое научное и практическое значение. Насущной задачей является установление детального генезиса длительных изменений уровня и на этой основе разработки методологии его междесятилетнего прогнозирования. Серьезную озабоченность резким падением уровня моря

выразил Президент Азербайджана Г. Алиев, который на Каспийском саммите 2022 г. сказал, что проблема обмеления моря нас крайне волнует. И поэтому необходима тщательная экспертиза ее причин.

Однако надежных методов УКМ на перспективу не существует. Наиболее часто используемые для этой цели климатические модели плохо описывают даже современный климат Каспийского моря, что указывает их непригодность для прогноза уровня моря на длительную перспективу (конец столетия). В предположении стационарности (неизменности) воспроизводимых ими климатических условий выполняется интегрирование моделей на длительный срок, что приводит к накоплению ошибок, вследствие чего полученные результаты становятся крайне ненадежными.

Существует высокая вероятность того, что стабилизация колебаний УКМ может произойти при достижении уровня отметки $-30,6$ м БС, поскольку в этом случае оголяется дно пролива КБГ и прекращается сток в залив. Дополнительно действие морфометрического фактора (сокращение испарения за счет уменьшения площади моря), возможно, компенсирует тренд в испарении при росте глобального потепления. Поэтому маловероятно, что УКМ понизится ниже -31 м БС, и Каспий повторит судьбу Аральского моря.

Список источников

1. Варущенко С. И., Варущенко А. Н., Клиге Р. К. Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М., Наука, 1987. 240 с.
2. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд. РГТМИ, 1994. 160 с.
3. Малинин В. Н. Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Изв. РАН. Серия географическая. 2009. № 6. С. 7—16.
4. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада Лтд, 2016. 378 с.
5. Малинин В. Н., Радикевич В. М., Гордеева С. М., Куликова Л. А. Изменчивость индексов вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой. СПб., Гидрометеиздат, 2003, 171 с.
6. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан—атмосфера—суша» // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 5—20. doi: 10.17076/lim1156.
7. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980—2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
8. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е — 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 195—207. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
9. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 6993—7001. doi: 10.1002/2017GL073958.
10. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. О возможных изменениях толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 75—95. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95.
11. Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2021. V. 250. doi: 10.1016/j.ecss.2020.107150.
12. Saha S., et al. The NCEP Climate Forecast System version 2 // J. Clim. 2014. V. 27. P. 2185—2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

13. Фролов А. В. Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 120—128.
14. Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // Intern. J. Climatology. 2020. V. 40. P. 2717—2731. doi: 10.1002/joc.6362.
15. Elguindi N., Giorgi F. Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs // Climate Dynamics. 2006. V. 26. P. 167—181.
16. Renssen H., Longhead B. C., Aerts J. C., de Moel H., Ward P. J., Kwadijk J. C. J. Simulating long-term Caspian Sea level changes; the impact of Holocene and future climate conditions // Earth and Planetary Science Letters. 2007. V. 261. P. 685—693.
17. Kislov A. V., Panin A., Toropov P. A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // Quaternary International. 2014. V. 345. P. 48—55. doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.014.
18. Arpe K., Leroy S. The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled // Quaternary International. 2007. V. 173—174. P. 144—152.

References

1. Varushchenko S. I., Varushchenko A. N., Klige R. K. *Izmeneniya rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodoemov v paleovremeni = Changes in the regime of the Caspian Sea and inland reservoirs in paleotime*. Moscow: Nauka, 1987: 240 p. (In Russ.).
2. Malinin V. N. *Problema prognoza urovnya Kaspiiskogo morya = The problem of predicting the Caspian Sea level*. St. Petersburg: RSHI Publ., 1994: 160 p. (In Russ.).
3. Malinin V. N. Long-term forecasting of the Caspian Sea level. *Izv. RAN. Ser. Geogr. = Izv. RAN. Geographical ser.* 2009;(6):(7—16). (In Russ.).
4. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz = Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and predicting*. Moscow: Triada Ltd, 2016: 378 p. (In Russ.).
5. Malinin V. N., Radikevich V. M., Gordeeva S. M., Kulikova L. A. *Izmenchivost' vikhrevoi aktivnosti atmosfery nad Severnoi Atlantikoi = The variability of atmosphere vortex activity over the North Atlantic*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003: 171 p. (In Russ.).
6. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Caspian sea level as an indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(4):(5—20). doi: 10.17076/lim1156. (In Russ.).
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980—2020). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021;18;(5):277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291. (In Russ.).
8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G. Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s — 2017). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;15;(7):195—207. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207. (In Russ.).
9. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):6993—7001. doi: 10.1002/2017GL073958.
10. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. Caspian seas ice thickness possible changes in the current century. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(62):75—95. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95. (In Russ.).
11. Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021;(250):107—150. doi: 10.1016/j.ecss.2020.107150.
12. Saha S., et al. The NCEP Climate Forecast System version 2. *J. Clim.* 2014;(27):2185—2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
13. Frolov A. V. Features of the mechanism of the long-term fluctuations in the Caspian sea level. *Uchenyye zapiski RGGMU = Proceedings RSHU*. 2019;(55):120—128. (In Russ.).

14. Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *Intern. J. Climatology*. 2020;(40):2717—2731. doi: 10.1002/joc.6362.
15. Elguindi N., Giorgi F. Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs. *Climate Dynamics*. 2006;(26):167—181.
16. Renssen H., Longhead B. C., Aerts J. C., de Moel H., Ward P. J., Kwadijk J. C. J. Simulating long-term Caspian Sea level changes; the impact of Holocene and future climate conditions. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007;(261):685—693.
17. Kislov A. V., Panin A., Toropov P. A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations. *Quaternary International*. 2014;(345):48—55. doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.014.
18. Arpe K., Leroy S. The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled. *Quaternary International*. 2007;(173—174):144—152.

Информация об авторе

Валерий Николаевич Малинин, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО—МОК и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Information about author

Valery N. Malinin, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, UNESCO—IOC Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

Статья поступила 02.10.2022

Принята в печать 17.11.2022

The article was received on 02.10.2022

The article was accepted 17.11.2022

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-761-762

К 70-летию Александра Сергеевича Аверкиева



7 октября 2022 г. исполнилось 70 лет профессору кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и комплексного управления прибрежными зонами РГГМУ, доктору географических наук, доценту Аверкиеву Александру Сергеевичу.

Александр Сергеевич в 1974 г. окончил с отличием океанологический факультет Ленинградского государственного гидрометеорологического института (сейчас РГГМУ). После службы в Военно-воздушных силах Советской Армии в 1976 г. начал свою трудовую деятельность инженером в Проблемной лаборатории Взаимодействия океана и атмосферы и Подводных исследований РГГМУ. После обучения в очной аспирантуре РГГМУ под руководством профессора Б. А. Кагана он успешно в 1984 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук.

С тех пор А. С. Аверкиев прошел в РГГМУ путь от старшего научного сотрудника до декана Океанологического факультета, профессора одной из ведущих кафедр Университета, получил ученое звание доцента, а в 2013 г. — ученую степень доктора географических наук.

За время работы в университете Александр Сергеевич ведет активную научную деятельность. Много лет он успешно сотрудничал с Полярным и Атлантическим институтами рыбного хозяйства и океанографии, являлся научным

руководителем договорных работ с этими институтами. Совместно с сотрудниками этих институтов участвовал в научно-исследовательских рейсах и опубликовал несколько статей и методических пособий.

С 1991 по 1999 г. А. С. Аверкиев являлся директором Малого научного внедренческого предприятия, учредителем которого был РГГМУ. Работа предприятия послужила укреплению связей сотрудников РГГМУ с бассейновыми институтами и продолжала развитие тематики морских гидрологических и промысловых прогнозов. Областью научных интересов А. С. Аверкиева являются также вопросы взаимодействия атмосферы и океана, влияния циклонов на верхний слой океана и формирования штормовых нагонов в морях и заливах. К настоящему времени им опубликовано более 100 научных работ, включая три учебных пособия и разделы в двух коллективных монографиях. Он неоднократно участвовал в международных и всероссийских конференциях.

А. С. Аверкиев принимал участие и организовывал длительные научные и многочисленные учебно-научные морские экспедиции, был заместителем начальника экспедиции на НИС «Нерей» и УЭС «Профессор Дорофеев», руководил группой сотрудников и студентов-океанологов в Кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» в 2014—2015 гг.

С 2000 г. Александр Сергеевич целиком на преподавательской работе. В 2002 г. он был избран на должность декана океанологического факультета и был им до 2017 г. В 2000-х гг. океанологический факультет был одним из самых больших факультетов университета, обладал наибольшим портфелем научных заказов, студенты и сотрудники активно участвовали в научной и общественной жизни университета, студенты проходили практику в ведущих научных учреждениях Академии наук РФ, Росгидромета Федерального агентства по рыболовству.

В течение многих лет А. С. Аверкиев ведет ключевые дисциплины в обучении океанологов — «Морские гидрологические прогнозы», «Теория прогнозирования», «Научное и информационное обеспечение промышленного рыболовства». Он успешно руководит выпускными работами студентов. Под его руководством выпущены десятки инженеров-океанологов и бакалавров, более 20 магистров по направлению «Прикладная гидрометеорология».

Профессор Аверкиев А. С. является высококвалифицированным специалистом в своей области деятельности, пользуется заслуженным авторитетом у коллег, общителен и доброжелателен, участвует в общественной жизни кафедры и Университета, является членом Ученого совета Института гидрологии и океанологии, членом диссертационных советов по метеорологии и океанологии.

За многолетний труд А. С. Аверкиев удостоен звания «Почетный работник Высшего профессионального образования» и «Почетный работник РГГМУ», награжден медалью «В память 300-летия Санкт-Петербурга», Памятным знаком «Кругосветная экспедиция на ОИС «Адмирал Владимирский» 2014—2015 гг.», награждался Почетными грамотами Министерства науки и высшего образования, Росгидромета, Губернатора Санкт-Петербурга.

Желаем Вам, дорогой Александр Сергеевич, крепкого здоровья, творческого долголетия и многих лет плодотворной научной и педагогической деятельности.

Коллеги, друзья, ученики

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-763-765

Летняя школа «Международные отношения и устойчивое развитие»

С 19 по 27 августа проходила Летняя школа «Международные отношения и устойчивое развитие», которая была организована РГГМУ и ФГАОУ ВО «Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации» (МГИМО) в рамках государственной программы поддержки университетов Российской Федерации «Приоритет 2030».

В работе Летней школы, которая была организована в поселке Репино Курортного района Санкт-Петербурга, в рамках трека «Устойчивое развитие» приняли участие 26 студентов из четырех университетов. От РГГМУ участвовало 11 студентов: пять — с Экологического факультета, два — с Метеорологического, четыре — с Института морского права, экономики и управления. Из МГИМО участвовало 11 студентов. Также в работе Летней Школы приняли участие три студента из Пятигорского государственного университета и один студент из Санкт-Петербургского государственного университета. В работе трека «Международные отношения» приняли участие 18 студентов из 10-ти организаций.

Научным руководителем трека «Устойчивое развитие» со стороны МГИМО являлась Рязанова Наталья Евгеньевна, кандидат географических наук, заведующая лабораторией геоэкологии и устойчивого природопользования кафедры



Участники школы

Международных комплексных проблем природопользования и экологии МГИМО, а со стороны РГГМУ — Дроздов Владимир Владимирович, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой Геоэкологии, природопользования и экологической безопасности РГГМУ, заведующий научной лабораторией «Экология и климат». Научным руководителем трека «Международные отношения» являлся Троицкий Михаил Алексеевич, кандидат политических наук, директор Института международных отношений и управления МГИМО.

Работа трека по «Устойчивому развитию» была реализована в рамках четырех тематических кластеров, в составе которых проводились лекции ведущих специалистов, были организованы экскурсии на природные особо охраняемые территории и объекты культурно-исторического наследия, подготовлены и защищены студенческие проектные работы.

Н.Е. Рязанова провела в рамках каждого Кластера проектно-ориентированные презентации, в которых для студентов раскрывались особенности, количественные и качественные показатели, используемые для оценки достижения целей устойчивого развития конкретного региона, в том числе особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Состоялись экскурсии на ООПТ — памятник природы регионального значения «Комаровский берег» на северном побережье Невской губы, государственный природный заказник «Западный Котлин» на о. Котлин с посещением г. Кронштадт. Также состоялись экскурсии на объекты культурно-исторического наследия — в старинный город Выборг на северо-западе Ленинградской области, в государственный историко-архитектурный и природный музей заповедник «Парк Монрепо», а также в музей-усадьбу выдающегося художника И.Е. Репина «Пенаты» в поселке Репино. Для студентов и сотрудников трека «Международные отношения» были организованы экскурсии по историческому центру Санкт-Петербурга.

В заслушивании и оценке проектных работ участвовали внешние приглашенные эксперты: Костенко Наталья Юрьевна (пресс-секретарь Дирекции особо охраняемых территорий Ленинградской области), Надточий Екатерина Викторовна (ведущий специалист сектора экологического просвещения отдела развития системы особо охраняемых территорий Санкт-Петербурга), Вячеслав Михайлович Щербаков (директор Национального парка «Красноярские Столбы»). Все проектные работы отличались высокой актуальностью и информативностью в представлении материалов. Первые три проекта получили наибольшие оценочные баллы. Все участники Летней Школы получили сертификаты.

Успешное проведение Летней Школы стало возможным благодаря комплексному взаимодействию между различными подразделениями РГГМУ и МГИМО. Научные руководители Летней Школы выражают благодарность за помощь в организации и проведении программах мероприятий: административному директору Летней Школы Кузнецову Борису Витальевичу, Посуховой Олесе Валерьевне — заместителю директора Фонда развития (Эндаумента) МГИМО, Мясникову Игорю Геннадьевичу — директору департамента науки, технологий и инноваций РГГМУ, Шилову Дмитрию Владимировичу — и.о. директора Института Геоэкологического инжиниринга РГГМУ, Тимофеевой Анне Гарниковне — директору

Института непрерывного образования РГГМУ, Буренковой Анастасии Андреевны — заведующей кабинетом учебной Лаборатории Экологической безопасности и мониторинга окружающей среды кафедры Геоэкологии, природопользования и экологической безопасности РГГМУ, Лисовскому Андрею Яковлевичу — ассистенту кафедры Геоэкологии, природопользования и экологической безопасности РГГМУ и модератору информационных ресурсов в процессе проведения школы, организатору мастер-класса с демонстрацией приборов экологического мониторинга.

И, конечно же, особая благодарность сотрудникам ректората МГИМО и РГГМУ, благодаря плодотворному сотрудничеству которых и возникла возможность проведения данной Школы. Участники Летней Школы надеются на продолжение и развитие сотрудничества между нашими организациями!

Рабочая встреча между ФГБОУ «РГГМУ» и Научно-исследовательским институтом по защите окружающей среды и здоровья населения Вьетнама

01 ноября 2022 г. на базе университета состоялась рабочая встреча между ФГБОУ «Российский Государственный Гидрометеорологический Университет» (Russian State Hydrometeorological University) и Научно-исследовательским институтом по защите окружающей среды и здоровья населения (Scientific research institute for protection community health, ИЕН) из Социалистической Республики Вьетнам.

Со стороны ИЕН во встрече приняли участие:

- 1) Чинь Куок Кхань, проф., д.т.н., академик РАЕН, Председатель Научного совета ИЕН, глава делегации;
- 2) Фам Хоанг Хай, проф., д.т.н., руководитель научного проекта ИЕН;
- 3) Нгуен Кхань Вань, проф., д.т.н., ведущий научный сотрудник ИЕН;
- 4) Фам Куанг Хунг, д.э.н., ведущий научный сотрудник ИЕН;
- 5) Нгуен Ван Туан, доцент, д.т.н., ведущий научный сотрудник ИЕН;



Участники встречи

- 6) Нгуен Хыу Тхиен, инженер, научный сотрудник ИЕН;
- 7) Чань Дак Фонг, бакалавр-юрист, научный сотрудник ИЕН.

Со стороны РГГМУ во встрече участвовали:

- 1) Михеев Валерий Леонидович, к.ю.н., доцент, ректор;
- 2) Леонтьев Денис Валентинович, к.ю.н., проректор по развитию и научной работе;
- 3) Кудрявцев Владимир Николаевич, д.ф.-м.н., г.н.с., руководитель Лаборатории спутниковой океанографии;
- 4) Смышляев Сергей Павлович, д.ф.-м.н., профессор кафедры метеорологических прогнозов;
- 5) Поздняков Шамиль Рауфович, д.г.н., директор Института исследований континентальных водных объектов;
- 6) Дроздов Владимир Владимирович, к.г.н., доцент, заведующий кафедрой геоэкологии, природопользования и экологической безопасности;
- 7) Лобанов Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы;
- 8) Мясников Игорь Геннадьевич, директор Департамента науки, технологий и инноваций;
- 9) Шилов Дмитрий Владимирович, научный сотрудник, и.о. директора ИГЭИ;
- 10) Головина Елена Георгиевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы.



Участники встречи

Кроме того, в рабочей встрече приняли участие представители Общества российско-вьетнамской дружбы и заместитель председателя Комитета по внешним связям Правительства Санкт-Петербурга Калганов В. Г.

От имени РГГМУ Михеев В. Л. приветствовал вьетнамских гостей и ознакомил с историей создания и развития Университета, с его достижениями в образовательной и научно-исследовательской деятельности, направлениями работы ведущих лабораторий, а также с материально-технической базой учреждения. Модератором встречи выступил проректор по развитию и научной работе РГГМУ Леонтьев Денис Валентинович.

Основной темой обсуждения стал вопрос совместных научно-исследовательских работ по защите окружающей среды и здоровья населения в условиях изменения климата. С докладами выступили Леонтьев Д. В., Лобанов В. А., Дроздов В. В., Поздняков Ш. Р., Смышляев С. П., Кудрявцев В. Н., Тимофеева А. Г.

Стороны обсудили возможности совместного сотрудничества в области дистанционного зондирования земли, геоинформационных систем и информационных технологий, изучения динамики водных ресурсов и качества вод в условиях естественного развития гидрометеорологических процессов для создания базы данных гидрологической и гидрографической среды вдоль северо-восточного побережья Вьетнама, в частности провинции Куанг Нинь.

В завершении встречи был подписан итоговый протокол.

Глава делегации ИЕН Чинь Куок Кхань пригласил ректора и научных работников РГГМУ посетить Вьетнам в 2023 г. с ответным визитом для продолжения обсуждения вопросов и подписания Соглашения о долгосрочном сотрудничестве между обеими организациями. Приглашение с благодарностью было принято.

Вьетнамская делегация выразила искреннюю благодарность Руководству РГГМУ за теплый прием, плодотворную и полезную встречу.

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-769-771

Фестиваль национальных культур «Меридианы дружбы»

В конкурсной программе фестиваля приняли участие 10 команд. Команда Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна представила узбекскую культуру. От Российского государственного гидрометеорологического университета выступили сразу две команды: африканской республики Бенин и представители русской культуры. Команда Санкт-Петербургского военного ордена Жукова института войск национальной гвардии представила даргинский народ, а команда представительства Ямало-Ненецкого автономного округа в Санкт-Петербурге и землячества «Ямал — потомкам!» — ненецкую культуру. Ансамбль «Байн Цаг» — представители республики Калмыкия и команда Российского государственного педагогического университета имени Герцена, Институт Народов Севера. Команда Иркутского землячества «Ангара» — представители еврейской культуры. Ансамбль «Школьные годы» — культура корякского народа. И еще одна команда: ансамбль народного танца «Нарт» при осетинском землячестве.

Команды продемонстрировали знание традиций в приготовлении блюд национальной кухни, в проведении национальных игр и мастер-классов по прикладному творчеству. Но самыми яркими и зрелищными стали сценические выступления команд, во время которых были показаны традиционные обряды.

Зрители увидели корякский обряд «Хололо» и ненецкий обряд очищения огнем, бенинский обряд обращения к духам, узбекский килим салом, русский,



Участники фестиваля

еврейский и осетинский свадебные обряды, колымский обряд приветствия и даргинский обряд воспитания мужчины. Все они были оригинальны, уникальны и самобытны.

I место среди профессиональных коллективов занял ансамбль «Школьные годы».

I место среди молодежных студенческих коллективов с огромным отрывом получила команда Российского государственного гидрометеорологического университета, которая продемонстрировала русский свадебный обряд южных регионов России.

Для РГГМУ XIII фестиваль вообще оказался «урожайным». Команда республики Бенин заняла III место в общем зачете среди молодежных студенческих коллективов, а также получила бронзовые медали за участие в спартакиаде национальных игр, а серебряные медали завоевала русская команда.

Остальные награды распределились следующим образом:

— ансамбль народного танца «Нарт» при осетинском землячестве — II место среди профессиональных коллективов;

— команда Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна — II место среди молодежных студенческих коллективов;

— команда РГПУ имени Герцена, Институт Народов Севера — III место среди молодежных студенческих коллективов;

— команда Санкт-Петербургского военного ордена Жукова института войск национальной гвардии — грамота за вклад в мировую культуру и сохранение народных традиций и золотые медали в спартакиаде национальных игр;



Концертный номер участников фестиваля

— команда представительства Ямало-Ненецкого автономного округа в Санкт-Петербурге и землячества «Ямал — потомкам!» — грамота за вклад в мировую культуру и сохранение народных традиций;

— ансамбль «Байн Цаг» — грамота за вклад в мировую культуру и сохранение народных традиций;

— команда Иркутского землячества «Ангара» — грамота за вклад в мировую культуру и сохранение народных традиций.

Закончился XIII фестиваль национальных культур «Меридианы дружбы», но мы уверены, что у этого фестиваля будет еще долгая и счастливая история!

Мы будем встречаться снова и снова! Снова и снова удивлять и радовать друг друга! Ведь все меридианы рано или поздно пересекаются в одной точке, и эта точка — наш фестиваль!

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 69

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Начальник РИО А.В. Ляхтейнен
Технический редактор М.В. Иванова

Подписано в печать 26.12.2022. Выход в свет 30.12.2022. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,975. Тираж 50 экз. Заказ № 1329. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
