

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

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

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

**№ 74**

Научно-теоретический журнал

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

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2024

УДК 001(051.2)«540.1»  
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 74. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГТМУ, 2024. 164 с.

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

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

*Редакционный совет:*

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

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

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

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

*Редакционная коллегия:*

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

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

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГТМУ), 2024

© Авторы публикаций, 2024

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

---

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

# HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

## № 74

A theoretical research journal

*Published since October, 2005*  
*4 issues a year*

ISSN 2713-3001

St. Petersburg  
RSHU  
2024

UDC 001(051.2)«540.1»  
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 74. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2024. 164 p.

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

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

*The Editorial Board:*

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

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

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

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

*Editors:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ISSN 2713-3001

The Journal included in the List of the Higher Attestation Commission in the direction of science of the Earth, has category K2 and the environment is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

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

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

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2024  
© Authors of publications, 2024

## Содержание

### Метеорология

- Е. В. Капля.* Аппроксимация статистических распределений плотности воздуха в приземном слое атмосферы . . . . . 7
- А. А. Павловский.* Об оценке климатических рисков территории Санкт-Петербурга . . . . . 26
- А. Б. Селунский, В. В. Вакуленко, Д. М. Ермаков, А. В. Кузьмин, Е. В. Пашинов.* Детектирование и выделение атмосферных рек по данным наблюдений спутникового радиотепловидения . . . . . 44
- Т. Р. Шишкина, Ю. В. Ефимова, И. В. Лаврова, И. А. Иванова, Е. П. Иванова.* Формирование аномального термического режима осенью и весной на Европейской территории России . . . . . 57

### Гидрология

- В. И. Барышев, И. Л. Калюжный.* Влияние климатических изменений на водопоглотительную способность почв речных бассейнов Республики Башкортостан . . . . . 73
- Н. В. Двоеглазова, Б. В. Чубаренко.* Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения . . . . . 87
- М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова.* Картирование различного строения ледяного покрова на затороопасном участке реки Лены методом георадиолокации . . . . . 105

### Экология

- И. В. Андреева, И. В. Архипова, С. В. Циликينا.* Рекреационное водопотребление в туристских дестинациях Алтайского края и Новосибирской области: расчет и пространственный анализ . . . . . 120

### История. Хроника. Персоналии

- С. А. Кондратьев.* Восьмидесятилетний юбилей Института озероведения и Всероссийская научная конференция «Лимнология в России» (г. Санкт-Петербург, 12—14 февраля 2024 г.) . . . . . 135
- Г. И. Беликова, Е. А. Бровкина, И. В. Зайцева, В. В. Петрова, С. Н. Фадеев.* Роль математики в обучении студентов РГГМУ . . . . . 143
- Л. Б. Вампилова.* Итоги VII международной конференции «Исторический подход в географии и геоэкологии» . . . . . 153
- К 75-летию со дня рождения Владимира Львовича Квинта . . . . . 157
- Памяти Евгения Пантелеймоновича Борисенкова (1924 г. — 2005 г.) . . . . . 160

## Contents

### Meteorology

<i>E. V. Kaplya</i> . Approximation of the statistical distributions of atmospheric air density in the surface layer . . . . .	7
<i>A. A. Pavlovskii</i> . On the assessment of the climatic risks of the territory of St. Petersburg . . . . .	26
<i>A. B. Selunsky, V. V. Vakulenko, D. M. Ermakov, A. V. Kuzmin, E. V. Pashinov</i> . Detection and selection of atmospheric rivers according to observations of satellite radiothermovision . . . . .	44
<i>T. R. Shishkina, Y. V. Efimova, I. V. Lavrova, I. A. Ivanova, E. P. Ivanova</i> . Formation of an anomalous thermal regime in autumn and spring on the European territory of Russia . . . . .	57

### Hydrology

<i>V. I. Baryshev, I. L. Kalyuzhny</i> . Impact of Climatic Changes on Water Absorption Capacity of River Basin Soils of the Republic of Bashkortostan . . . . .	73
<i>N. V. Dvoeglazova, B. V. Chubarenko</i> . Changes in the structure of the hydrological characteristics of the estuary mixing zone of the Pregolya River (South-East Baltic) during saline water inflow period in autumn . . . . .	87
<i>M. P. Fedorov, L. L. Fedorova</i> . Mapping of different ice cover structure in the jam-prone section of the Lena River by ground penetrating radar method . . . . .	105

### Ecology

<i>I. V. Andreeva, I. V. Arkhipova, S. V. Tsilikina</i> . Recreational water use in tourist destinations of Altai Region and Novosibirsk Oblast: calculation and spatial analysis . . . . .	120
---	-----

<b>Story. Chronicle. Personalies</b> . . . . .	135
--	-----

Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 7—25.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):7—25

## ***METEOROLOGIA***

Научная статья  
УДК 551.510.3  
doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-7-25

### **Аппроксимация статистических распределений плотности воздуха в приземном слое атмосферы**

***Егор Викторович Капля***

Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград,  
ev-kaple@yandex.ru

*Аннотация.* Предложена аппроксимационная функция статистического распределения вероятности плотности воздуха в приземном слое атмосферы. Аппроксимационная функция содержит три параметра и обладает свойством сезонной, суточной и географической универсальности. Выборочные статистические оценки параметров найдены по месячно-часовым выборкам метеорологических данных: температуры и влажности воздуха и атмосферного давления в различных районах приземного слоя атмосферы. Выполнена проверка гипотезы о согласии аппроксимационной функции с эмпирическими распределениями с помощью критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова. Гипотеза о нормальности статистического распределения вероятности плотности атмосферного воздуха в приземном слое атмосферы отвергнута на основе критерия нормальности Харке-Бера.

*Ключевые слова:* плотность воздуха, аппроксимация статистического распределения, распределение плотности воздуха, приземный слой атмосферы, воздух у поверхности Земли.

*Для цитирования:* Капля Е. В. Аппроксимация статистических распределений плотности воздуха в приземном слое атмосферы // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 7—25. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-7-25.

## ***METEOROLOGY***

Original article

### **Approximation of the statistical distributions of atmospheric air density in the surface layer**

***Egor V. Kaplya***

Volgograd State Agrarian University, Volgograd Russia, ev-kaple@yandex.ru

*Summary.* The approximation function of the statistical probability distribution of air density in the surface layer of the atmosphere is proposed. The approximation function contains three parameters and has the property of seasonal, daily and geographical universality. The proposed approximation function

can be applied to statistical distributions of the probability of atmospheric air density in the surface layer in various regions of the Earth. The geographical universality of the new formulas has been verified for empirical statistical distributions of the atmospheric air density calculated on the basis of meteorological data obtained in areas with different types of climate. The seasonal and daily versatility of the new formulas has been verified by meteorological data from airport weather stations at different times of the year and day. The universality of the statistical mathematical model of the atmospheric air density in the surface layer of the atmosphere is achieved using new three-parameter formulas. These formulas are derived on the basis of logistic distributions of type I and II as a result of the introduction of a function that takes one of two values depending on the sign of the sample coefficient of asymmetry (sample skewness) of the empirical probability distribution of atmospheric air density in a given month and hour. Sample statistical estimates of parameters are found for monthly-hourly samples of meteorological data: air temperature and humidity and atmospheric pressure in various places of the surface layer of the atmosphere. The hypothesis of the agreement of the approximation function with empirical distributions was tested using the Pearson and Kolmogorov-Smirnov statistical tests. Empirical statistical distributions constructed on the basis of monthly-hourly samples of air density in the surface layer of the atmosphere have sample skewness and excess kurtosis unequal to zero. The hypothesis of the normality of the statistical probability distribution of atmospheric air density in the surface layer of the atmosphere is rejected on the basis of the Jarque-Bera test of normality distributions.

*Keywords:* air density, approximation of statistical distribution, distribution of air density, atmospheric surface layer, near-surface air density.

*For citation:* Капля Е. В. Approximation of the statistical distributions of atmospheric air density in the surface layer. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):7—25. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-7-25.

## Введение

Плотность воздуха учитывается в динамических моделях атмосферных процессов [1, 2], входит в уравнения динамики взвешенных частиц, загрязняющих атмосферу [3—5], присутствует в статистических расчётных формулах экологически чистой ветроэнергетики [6—9]. В этой статье рассматривается массовая плотность воздуха, которая в практических задачах используется чаще весовой плотности.

Плотность атмосферного воздуха непостоянна во времени и неравномерна в пространстве. Плотность воздуха зависит от температуры, давления, влажности и химического состава воздуха, а также от высоты над уровнем моря.

Датчики метеостанций измеряют атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, но не измеряют его плотность. С этим связан недостаток информации о статистических свойствах плотности атмосферного воздуха. Выражения для плотности воздуха, представленные в [10, 11], позволяют вычислить последовательности значений плотности воздуха на основе данных метеорологических станций.

Цели работы:

1. Исследование статистических распределений вероятности плотности атмосферного воздуха в приземном слое на основе выборки температуры и влажности воздуха и атмосферного давления.

2. Аппроксимация статистических распределений вероятности плотности воздуха в приземном слое атмосферы непрерывной гладкой функцией, параметры которой зависят от географического положения и времени.



### Расчёт плотности воздуха

Плотность атмосферного воздуха принято вычислять на основе измеренных значений температуры, давления и влажности воздуха. Известно [10, 11] несколько выражений, используемых для расчёта плотности воздуха в атмосфере Земли.

Плотность воздуха в задачах ветроэнергетики определяют в соответствии с действующими российскими и международными стандартами ветроэнергетики по значениям температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности воздуха с помощью формулы:

$$\rho(T, P_b, H) = \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{P_b}{R_0} - H \cdot P_{ws} \cdot \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{ws}} \right) \right), \quad (1)$$

где  $T$  — абсолютная температура воздуха в Кельвинах;  $P_b$  — атмосферное барометрическое давление в Паскалях;  $H$  — относительная влажность (в диапазоне от 0 до 1);  $P_{ws}$  — парциальное давление насыщенного водяного пара в Паскалях;  $H \cdot P_{ws}$  — фактическое парциальное давление водяного пара в Паскалях;  $R_0$  — газовая постоянная сухого воздуха, равная 287,05 Дж/(кг · К);  $R_{ws}$  — газовая постоянная водяного пара, равная 461,5 Дж/(кг · К).

Атмосферное барометрическое давление воздуха зависит от высоты над уровнем моря и погодных условий. Парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе, зависит от температуры и влажности воздуха и связано с барометрическим давлением. Плотность влажного воздуха меньше плотности сухого воздуха при тех же показателях температуры и давления.

### Парциальное давление насыщенного пара

Парциальное давление насыщенного пара зависит от температуры атмосферного воздуха. Величину парциального давления  $P_{ws}$  насыщенного водяного пара в стандартах ветроэнергетики рекомендуют определять с помощью выражения:

$$P_{ws} = 0,0000205 \cdot e^{0,0631846 \cdot T}, \quad \text{для } T > 0, \quad (2)$$

здесь  $T$  — абсолютная температура воздуха в Кельвинах;  $P_{ws}$  — в Паскалях.

Расчет парциального давления насыщенного водяного пара  $P_{ws}$  для соответствующей температуры  $T$  выполним с помощью более точной аппроксимационной формулы [10]:

$$P_{ws} = a_1 \cdot EF \cdot \exp\left(\frac{a_2 - T / a_3}{a_4 + T} \cdot T\right), \quad (3)$$

где

$$EF = 1 + k_1 + P_{mb} \cdot (k_2 + k_3 \cdot T^2), \quad (4)$$

$P_{mb}$  — атмосферное давление воздуха в миллибарах;  $T$  — температура в градусах Цельсия. Постоянные величины в формуле (3) имеют следующие значения для положительных температур:

$$a_1 = 6,1121; a_2 = 18,678; a_3 = 234,5; a_4 = 257,14;$$

$$k_1 = 7,2 \cdot 10^{-4}; k_2 = 3,2 \cdot 10^{-6}; k_3 = 5,9 \cdot 10^{-10}.$$

Для отрицательных температур:

$$a_1 = 6,1115; a_2 = 23,036; a_3 = 333,7; a_4 = 279,82;$$

$$k_1 = 2,2 \cdot 10^{-4}; k_2 = 3,83 \cdot 10^{-6}; k_3 = 6,4 \cdot 10^{-10}.$$

Осуществим перевод давления  $P_{mb}$  из миллибар в Паскали, используя в (4) соотношение  $P_{mb} = P_b/100$ .

Множитель  $EF$  учитывает зависимость парциального давления насыщенного пара от величины атмосферного давления  $P_{mb}$  и температуры  $T$  в окрестности нормального атмосферного давления. Множитель  $EF$  близок к 1, поэтому он может не учитываться в приближённых вычислениях [11], но в следующих расчётах и результатах этот множитель учтён с целью уменьшения риска потери точности.

### Группирование метеорологических данных

Исходные данные (временные последовательности температуры, атмосферного давления и относительной влажности воздуха) получены с метеостанций аэропортов [12] в формате METAR в 10-минутном осреднении. Осреднение метеорологических характеристик на 10-минутных отрезках времени устраняет влияние на последующие результаты микромасштабной атмосферной турбулентности и других микромасштабных атмосферных процессов, сопровождающихся флуктуациями метеорологических величин.

Сезонная и суточная изменчивость температуры и влажности [13] атмосферного воздуха приводит к сезонной и суточной изменчивости массовой плотности воздуха, поэтому целесообразно группировать метеорологические данные по номеру месяца и номеру часа в сутках. Сформируем месячно-часовые выборки плотности воздуха. Каждая месячно-часовая выборка содержит множество значений плотности воздуха, усреднённых на 10-минутных отрезках времени в начале заданного часа  $c$  (где  $c = 0, 1, \dots, 23$ ) во всех сутках заданного месяца с номером  $m$ , где  $m = 1, 2, \dots, 12$ . Объём месячно-часовых выборок можно увеличить путём включения в их состав значений плотности воздуха разных лет. На основе десятилетних данных (2013—2022 гг.) сформированы месячно-часовые выборки плотности воздуха объёмом 310 — для месяцев, в которых 31 день; выборки объёмом 300 — для месяцев, в которых 30 дней.

Рассмотрим эмпирические статистические распределения (рис. 1—4) плотности воздуха в месячно-часовых выборках, сформированных по описанному выше правилу для 2013—2022 гг. Плотность воздуха в приземном слое атмосферы на уровне моря принимает значения в диапазоне от  $1,0 \text{ кг/м}^3$  до  $1,5 \text{ кг/м}^3$ . Разделим этот отрезок на равные отрезки шириной  $\Delta\rho = 0,01 \text{ кг/м}^3$ . В этом случае количество отрезков группирования плотности воздуха будет равно  $M = 51$ . Существует вероятность того, что вычисленное и округлённое значение плотности воздуха

совпадёт с границей двух соседних отрезков. С целью однозначной группировки значений плотности  $\rho$  воздуха будем рассматривать полуинтервалы. Каждый полуинтервал с номером  $i$  ограничен неравенством:

$$\rho_i - \frac{\Delta\rho}{2} \leq \rho < \rho_i + \frac{\Delta\rho}{2}.$$

В результате группирования расчётных значений плотности воздуха, вычисленных с помощью формул (1), (3), (4) по данным [12] метеостанций аэропортов Волгограда, Хабаровска, Мурманска и Сочи, построены гистограммы эмпирических распределений вероятности плотности воздуха в разное время года и суток ( $m$  — номер месяца,  $c$  — номер часа).

На рис. 1—4 отмечены величины:  $\rho_{sa} = 1,225 \text{ кг/м}^3$  — стандартная плотность воздуха на уровне моря, которая соответствует плотности сухого воздуха при  $15^\circ\text{C}$  и давлении  $101330 \text{ Па}$  (в соответствии с Международной стандартной атмосферой);  $\rho_0 = 1,204 \text{ кг/м}^3$  — плотность сухого воздуха при нормальных условиях (температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении  $101325 \text{ Па}$ ).

Гистограммы (рис. 1—4) эмпирических распределений вероятности плотности атмосферного воздуха обладают чётко выраженной асимметрией, поэтому аппроксимация таких распределений симметричными статистическими законами (например, нормальным законом или законом Лапласа) в рассмотренных типичных примерах приводит к большим погрешностям аппроксимации.

Количественной мерой асимметрии (скошенности) статистического распределения является коэффициент асимметрии — безразмерная характеристика несимметричности распределения. Все симметричные распределения имеют нулевой коэффициент асимметрии.

### Асимметрия эмпирических распределений

Выборочный коэффициент асимметрии (ВКА) — эмпирическая характеристика асимметрии распределения. ВКА вычисляют с помощью формулы [14], которая применительно к месячно-часовым выборкам плотности воздуха принимает вид:

$$S_{m,c} = \frac{\frac{1}{N_{m,c}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{m,c}} (\rho_n - \overline{\rho_{m,c}})^3}{\left[ \frac{1}{N_{m,c}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{m,c}} (\rho_n - \overline{\rho_{m,c}})^2 \right]^{3/2}}, \quad (5)$$

где:  $S_{m,c}$  — ВКА месячно-часовой выборки плотности воздуха;  $N_{m,c}$  — объём месячно-часовой выборки плотности воздуха, т. е. количество экспериментальных значений плотности воздуха, соответствующих месяцу  $m$  и часу  $c$ ;  $n$  — номер элемента месячно-часовой выборки;  $\rho_n$  — плотность воздуха (элемент месячно-часовой выборки);  $\overline{\rho_{m,c}}$  — среднее арифметическое (многолетнее) значение плотности воздуха в заданном месяце и в заданный час суток.

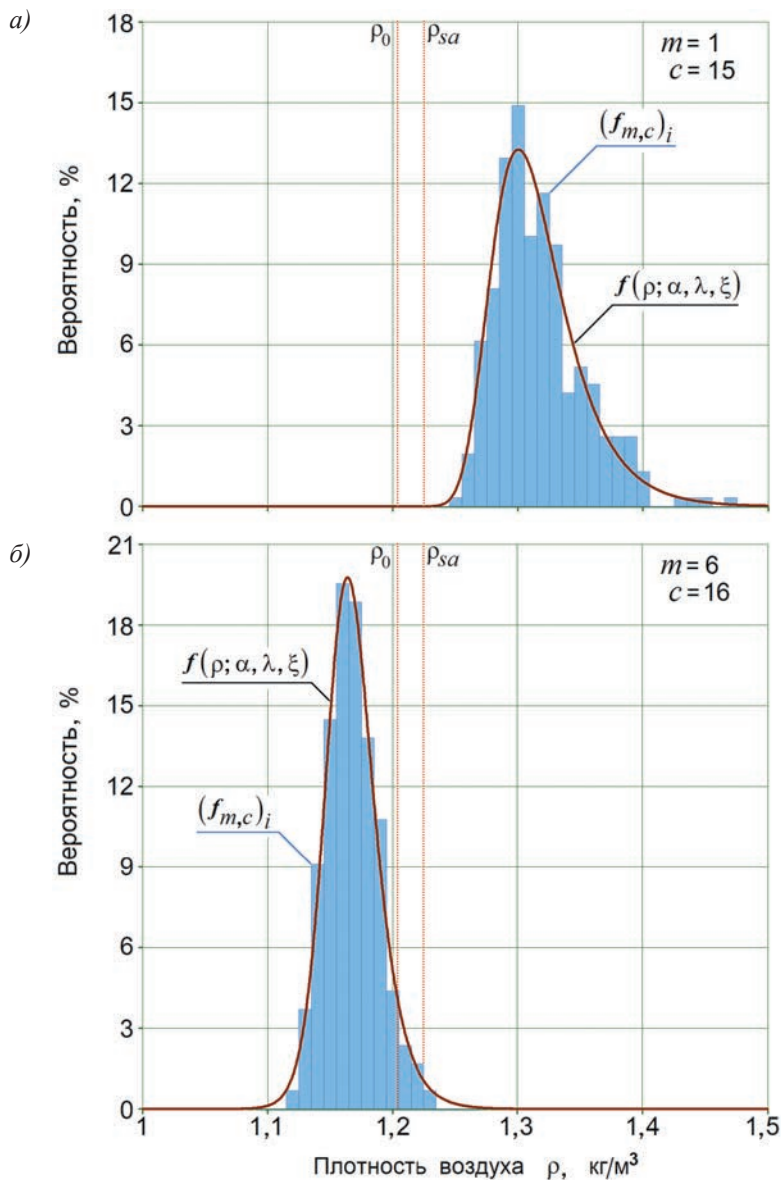


Рис. 1. Нормированные столбчатые гистограммы статистического распределения плотности атмосферного воздуха и графики аппроксимационной функции (9), построенные на основе месячно-часовых выборок 2013—2022 гг. метеостанции аэропорта г. Волгограда (UTC+3): а)  $m = 1$ ,  $c = 15$ ; б)  $m = 6$ ,  $c = 16$ .

Fig. 1. Normalized columnar histograms of the statistical distribution of atmospheric air density and graphs of the approximation function (9), based on monthly-hourly samples from 2013—2022 of the Volgograd airport weather station (UTC+3): а)  $m = 1$ ,  $c = 15$ ; б)  $m = 6$ ,  $c = 16$ .

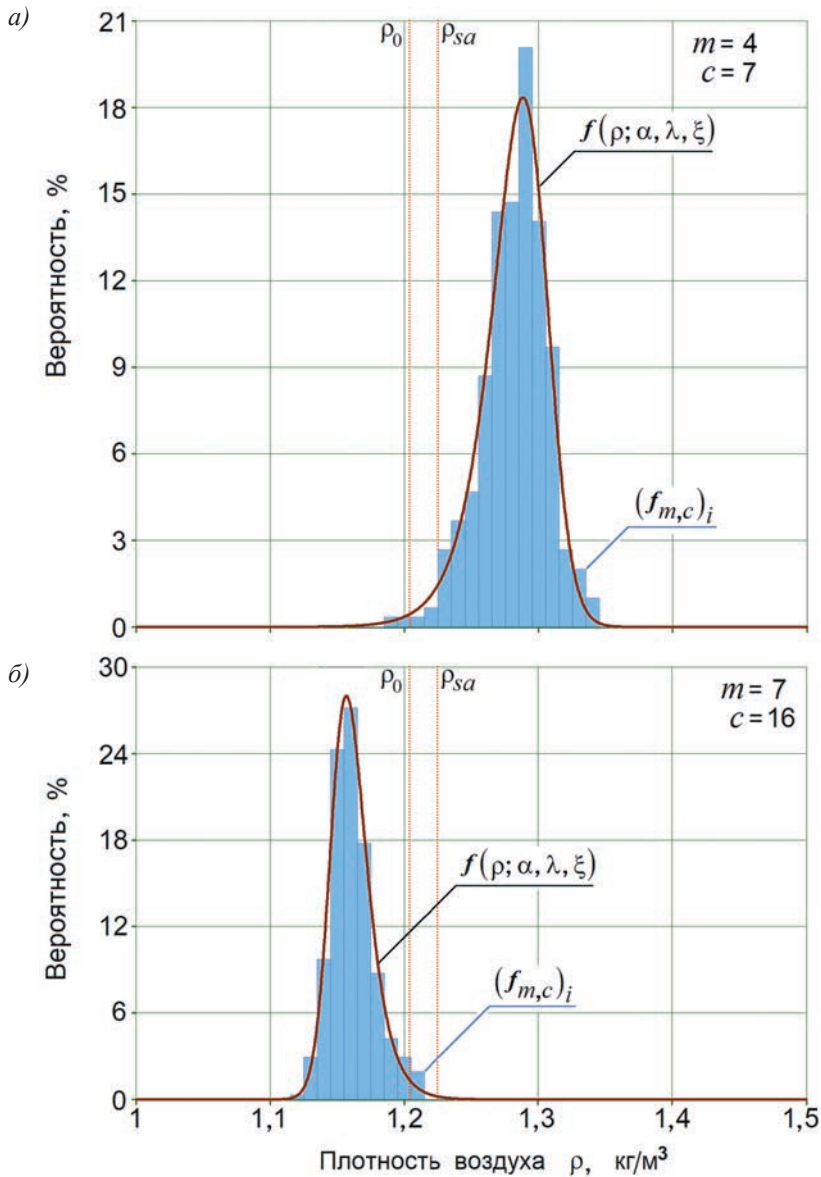


Рис. 2. Нормированные столбчатые гистограммы статистического распределения плотности атмосферного воздуха и графики аппроксимационной функции (9), построенные на основе месячно-часовых выборок 2013—2022 гг. метеостанции аэропорта г. Хабаровска (UTC+10): а)  $m = 4$ ,  $c = 7$ ; б)  $m = 7$ ,  $c = 16$ .

Fig. 2. Normalized columnar histograms of the statistical distribution of atmospheric air density and graphs of the approximation function (9), based on monthly-hourly samples from 2013—2022 of the Khabarovsk airport weather station (UTC+10): а)  $m = 4$ ,  $c = 7$ ; б)  $m = 7$ ,  $c = 16$ .

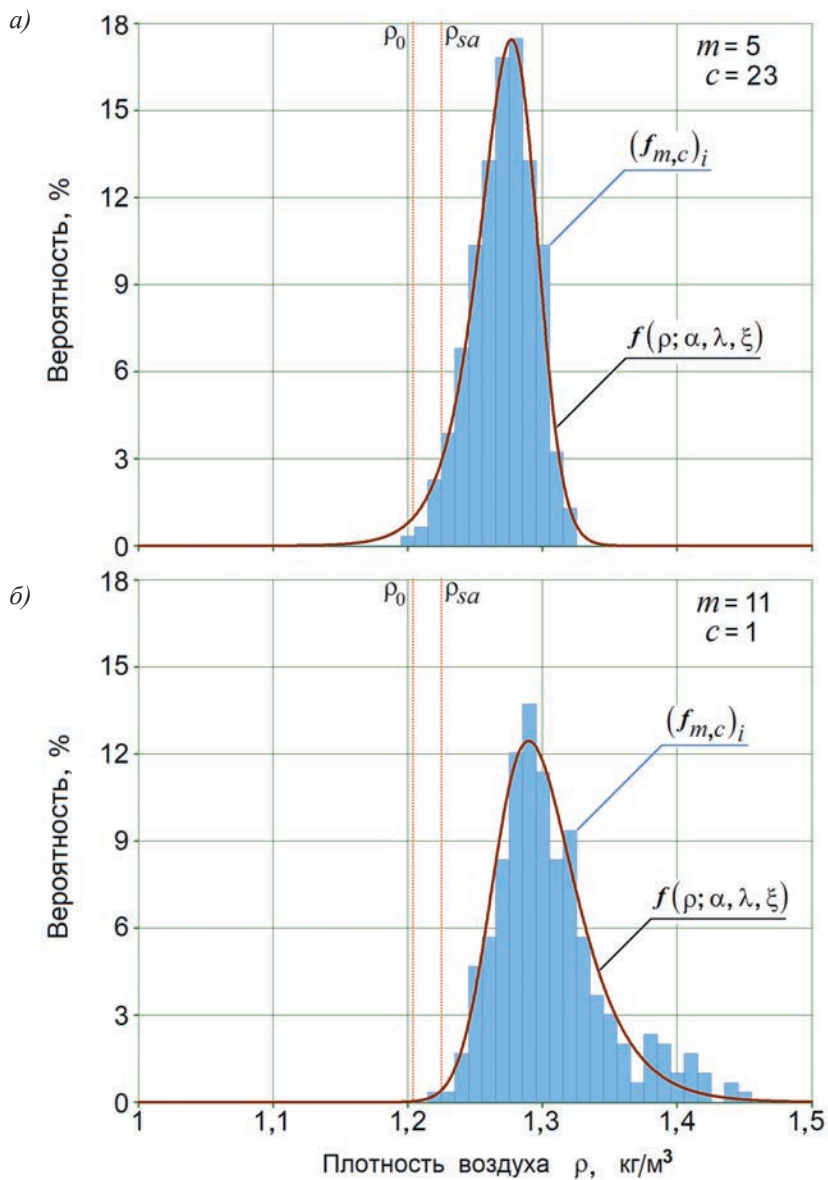


Рис. 3. Нормированные столбчатые гистограммы статистического распределения плотности атмосферного воздуха и графики аппроксимационной функции (9), построенные на основе месячно-часовых выборок 2013—2022 гг. метеостанции аэропорта г. Мурманска (UTC+3): а)  $m = 5$ ,  $c = 23$ ; б)  $m = 11$ ,  $c = 1$ .

Fig. 3. Normalized columnar histograms of the statistical distribution of atmospheric air density and graphs of the approximation function (9), based on monthly-hourly samples from 2013—2022 of the Murmansk airport weather station (UTC+3): а)  $m = 5$ ,  $c = 23$ ; б)  $m = 11$ ,  $c = 1$ .

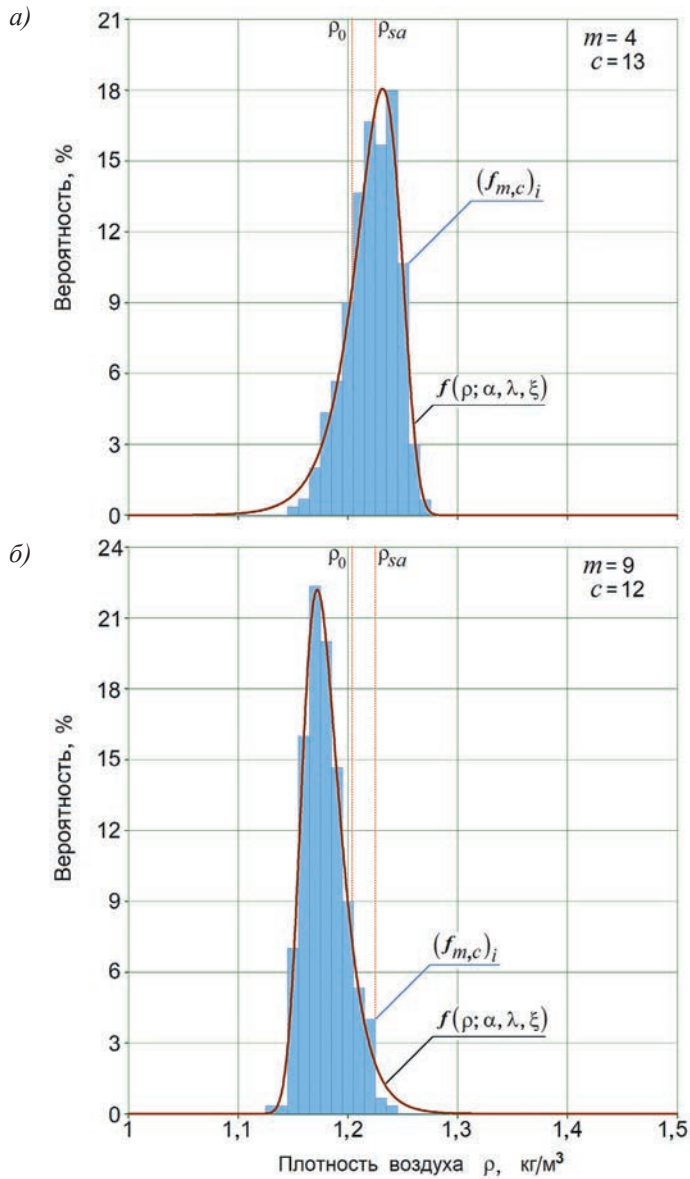


Рис. 4. Нормированные столбчатые гистограммы статистического распределения плотности атмосферного воздуха и графики аппроксимационной функции (9), построенные на основе месячно-часовых выборок 2013—2022 гг. метеостанции аэропорта г. Сочи (UTC+3): а)  $m = 4$ ,  $c = 13$ ; б)  $m = 9$ ,  $c = 12$ .

Fig. 4. Normalized columnar histograms of the statistical distribution of atmospheric air density and graphs of the approximation function (9), based on monthly-hourly samples from 2013—2022 of the Sochi airport weather station (UTC+3): а)  $m = 4$ ,  $c = 13$ ; б)  $m = 9$ ,  $c = 12$ .

ВКА статистических распределений, построенных по месячно-часовым выборкам (2013–2022 гг.) плотности воздуха в аэропорту Волгограда, варьируется от  $-0,095$  до  $0,990$ . Наибольшие значения ВКА наблюдаются в Волгограде в зимние месяцы, минимальные — в апреле и в мае.

В районах с континентальным климатом преобладающее количество элементов матрицы  $S_{m,c}$  положительны. Высокий по модулю уровень ВКА свидетельствует об асимметрии (скошенности) статистического распределения плотности воздуха. Аппроксимация скошенных эмпирических распределений нормальным распределением или другим симметричным распределением (например, распределением Лапласа) некорректна. Идентификация статистического закона распределения выполняется на основе вычисления нескольких характеристик, среди которых ВКА и ВКЭ.

### Экссесс эмпирических распределений

Выборочный коэффициент эксцесса (ВКЭ) — количественная характеристика острровершинности эмпирического распределения. Избыточный ВКЭ вычисляют с помощью формулы [14], которая применительно к месячно-часовым выборкам плотности воздуха принимает вид:

$$K_{m,c} = \frac{\frac{1}{N_{m,c}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{m,c}} (\rho_n - \overline{\rho_{m,c}})^4}{\left[ \frac{1}{N_{m,c}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{m,c}} (\rho_n - \overline{\rho_{m,c}})^2 \right]^2} - 3, \quad (6)$$

где  $K_{m,c}$  — избыточный ВКЭ месячно-часовой выборки плотности воздуха в приземном слое атмосферы в заданный месяц и заданный час суток.

ВКЭ эмпирических статистических распределений, построенных по месячно-часовым выборкам (2013—2022 гг.) плотности воздуха в приземном слое по данным метеостанции аэропорта Волгограда, варьируется от  $-0,700$  до  $1,824$ .

Высокий уровень эксцесса — признак несоответствия эмпирического распределения плотности воздуха в месячно-часовых выборках нормальному закону распределения, так как нормальное распределение имеет нулевой эксцесс. Аппроксимацию эмпирического распределения плотности воздуха целесообразно осуществлять на основе функции с варьируемым коэффициентом эксцесса.

С целью строгой проверки гипотезы о нормальности распределения необходимо проведение статистического теста с проверкой критерия нормальности, основанного на величинах ВКЭ и ВКА.

### Тест на нормальность эмпирических статистических распределений

Статистический критерий Харке-Бера — критерий для проверки совместной нулевой гипотезы о том, что асимметрия и избыточный эксцесс случайной величины в заданной выборке равны нулю [15]. Критерий позволяет подтвердить или



отвергнуть гипотезу о нормальности статистического распределения случайной величины на основе величины эксцесса и величины асимметрии эмпирического распределения, построенного на основе экспериментальной выборки.

Критерий Харке-Бера для проверки нормальности эмпирических статистических распределений учитывает коэффициенты асимметрии и эксцесса эмпирических распределений. Этот критерий рекомендовано [16] применять для проверки нормальности статистических распределений гидрометеорологических величин.

Статистика Харке-Бера строится [15] на основе выборочных оценок эксцесса и асимметрии. Применим аналогичное матричное выражение на основе матриц коэффициентов асимметрии и эксцесса, соответствующих месячно-часовым выборкам плотности воздуха, для формирования матрицы тестовых статистик, соответствующих тем же выборкам:

$$J_{m,c} = \frac{N_{m,c}}{6} \cdot \left( S_{m,c}^2 + \frac{K_{m,c}^2}{4} \right), \quad (7)$$

здесь:  $J_{m,c}$  — тестовая статистика для проверки нормальности распределения, соответствующего месячно-часовой выборке заданного месяца и часа.

Статистика  $J$  имеет распределение хи-квадрат с двумя степенями свободы. Статистика  $J$ , построенная на основе данных, соответствующих нормальному закону распределения, асимптотически стремится к распределению хи-квадрат с двумя степенями свободы. Основным недостатком критерия Харке-Бера является медленная асимптотическая сходимость тестовой статистики, поэтому для проверки нормальности распределений на основе квантильной функции распределения хи-квадрат необходимо иметь экспериментальные выборки объёмом  $N_{m,c} \geq 200$ . Все анализируемые выборки с большим запасом удовлетворяют указанному условию и, следовательно, считаются представительными.

Критическое значение  $\tilde{J}$  статистики критерия Харке-Бера равно квантилю  $q\chi^2(\tilde{p}, \nu)$  распределения хи-квадрат [15] с доверительной вероятностью  $\tilde{p}$  и числом степеней свободы  $\nu = 2$ . Гипотеза о нормальности статистического распределения случайной величины на основе величины эксцесса и величины асимметрии эмпирического распределения считается подтверждённой, если выполняется условие:

$$J_{m,c} < \tilde{J}. \quad (8)$$

Условие (8) не выполняется почти для всех месячно-часовых выборок плотности воздуха в приземном слое атмосферы с доверительной вероятностью  $\tilde{p} = 99\%$  и, следовательно, статистические распределения вероятности плотности воздуха в месячно-часовых выборках не являются нормальными.

### Аппроксимация эмпирических распределений плотности воздуха

Переход от дискретных эмпирических распределений вероятности к непрерывным теоретическим распределениям можно осуществить путём аппроксимации

эмпирических распределений гладкими непрерывными функциями, удобными при интегрировании.

Эмпирические распределения вероятности плотности воздуха в месячно-часовых выборках будем аппроксимировать функцией статистической плотности вероятности следующего вида:

$$f(\rho; \alpha, \lambda, \xi) = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\exp\left(-k(\alpha) \cdot \frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)}{\left[1 + \exp\left(-\frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)\right]^{\alpha+1}}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  — безразмерный параметр формы;  $\lambda$  — параметр масштаба;  $\xi$  — параметр смещения. Параметры  $\lambda$  и  $\xi$  имеют размерность плотности ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Частными случаями формулы (9) являются обобщенные логистические распределения типа I и II, описанные в [17, 18]. Обобщенные логистические распределения типа I и II представляют особый интерес, поскольку имеют вариабельный коэффициент асимметрии и позволяют учесть асимметрию данных. Коэффициент асимметрии распределения, заданного функцией (9), варьируется на отрезке от  $-2$  до  $+2$ . Этот отрезок включает в себя диапазон расчётных значений выборочного коэффициента асимметрии эмпирических распределений вероятности плотности воздуха в приземном слое атмосферы.

Безразмерная функция  $k(\alpha)$  определяет тип обобщённого логистического распределения (I или II). Функция  $k(\alpha)$  принимает одно из двух значений в зависимости от знака коэффициента  $s$  асимметрии эмпирического статистического распределения вероятности плотности воздуха. Функцию  $k(\alpha)$  представим в следующем виде:

$$k(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{если } S_{m,c} \geq 0; \\ \alpha, & \text{если } S_{m,c} < 0; \end{cases}$$

где  $S_{m,c}$  — коэффициент асимметрии эмпирического статистического распределения вероятности плотности воздуха в месяце с номером  $m$  в час с номером  $c$ . При  $S_{m,c} > 0$  наиболее вероятное значение плотности воздуха меньше среднего значения плотности воздуха, а при  $S_{m,c} < 0$  наиболее вероятное значение плотности больше среднего значения.

Начальные приближения значений параметров аппроксимационной функции (9) целесообразно выбрать из следующих отрезков:

$$1 \leq \alpha \leq 10; 0,01 \leq \lambda < 0,03; 1,1 < \xi < 1,3.$$

Значения параметров функции (9), вычисленные для месячно-часовых выборок плотности воздуха с помощью модифицированного метода Ньютона, индивидуальны для каждой комбинации номера месяца и номера часа, поэтому есть смысл рассматривать прямоугольные матрицы размером  $12 \times 24$  с элементами  $\alpha_{m,c}$ ,  $\lambda_{m,c}$ ,  $\xi_{m,c}$ .

Теоретические распределения плотности вероятности, полученные на основе формулы (9), визуально соответствуют (рис. 1—4) экспериментальным

гистограммам, построенным на основе месячно-часовых выборок плотности воздуха в приземном слое атмосферы.

### Целевая функция

Задача поиска значений параметров статистического закона (9) сводится к минимизации среднеквадратических ошибок аппроксимации статистической плотности распределения вероятности массовой плотности атмосферного воздуха:

$$\sigma_{m,c} = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \left( (f_{m,c})_i - f(\rho_i; \alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}) \right)^2}, \quad (10)$$

где  $i$  — номер полуинтервала группирования экспериментальных значений плотности воздуха;  $M$  — количество полуинтервалов группирования плотности воздуха;

$(f_{m,c})_i = \frac{(Y_{m,c})_i}{\Delta\rho \cdot N_{m,c}}$  — эмпирическая статистическая плотность распределения вероятности попадания значения плотности воздуха в полуинтервал с номером  $i$  в месяце  $m$  в час  $c$ ;  $(Y_{m,c})_i$  — экспериментальная частота попадания значения

плотности воздуха в полуинтервал с номером  $i$  в месяце  $m$  в час  $c$ ;  $N_{m,c} = \sum_{i=1}^M (Y_{m,c})_i$ ;

$\Delta\rho$  — ширина полуинтервалов группирования плотности воздуха.

Минимизация ошибок аппроксимации эмпирического распределения вероятности плотности воздуха возможна в случае минимизации целевой функции следующего вида:

$$C(\alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}) = \sum_{i=1}^M \left( (f_{m,c})_i - f(\rho_i; \alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}) \right)^2, \quad (11)$$

Целевая функция (11) составлена на основе метода наименьших квадратов.

### Результаты аппроксимации

В результате варьирования трёх параметров аппроксимационной функции (9) и минимизации целевой функции (11) вычислены оптимальные комбинации параметров  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\xi$  функции (9) на основе метеорологических данных метеостанций, расположенных в различных местах России. Параметры функции (9) варьируются в следующих пределах:  $1 < \alpha_{m,c} < 80$ ;  $0,01 < \lambda_{m,c} < 0,03$ ;  $1,1 < \xi_{m,c} < 1,32$ .

Вычисленные оптимальные значения параметров, соответствующих гладким кривым на рисунках 1—4, собраны в таблице 1.

Случайный выбор разных сочетаний  $m$  и  $c$  позволяет показать сезонную и суточную универсальность предлагаемой аппроксимационной функции (9) без рассмотрения всех возможных комбинаций  $m$  и  $c$ . Знак коэффициента асимметрии эмпирических распределений определяет тип асимметрии распределения и значение функции  $k(\alpha)$ , входящей в состав аппроксимационной функции (9).

Таблица 1

Значения параметров аппроксимационной функции (9)  
 Values of the parameters of the approximation function (9)

Рисунок	Месяц	Час	Параметры аппроксимационной функции			$S_{m,c}$
	$m$	$c$	$\alpha_{m,c}$	$\lambda_{m,c}$	$\xi_{m,c}$	
1а	1	15	36,511	0,027	1,202	$S_{m,c} > 0$
1б	6	16	1,868	0,015	1,154	$S_{m,c} > 0$
2а	4	7	3,214	0,017	1,309	$S_{m,c} < 0$
2б	7	16	2,992	0,011	1,144	$S_{m,c} > 0$
3а	5	23	3,026	0,018	1,297	$S_{m,c} < 0$
3б	11	1	4,513	0,027	1,249	$S_{m,c} > 0$
4а	4	13	45,198	0,020	1,308	$S_{m,c} < 0$
4б	9	12	9,333	0,016	1,137	$S_{m,c} > 0$

Межгодовая изменчивость температуры и плотности воздуха не является причиной наличия асимметрии этих статистических распределений, так как знак коэффициента асимметрии распределений для многолетних и однолетних месячно-часовых выборок совпадает.

Асимметрия статистических распределений плотности воздуха является следствием наложения сезонных колебаний плотности воздуха с годовым периодом, внутрисезонных, мезометеорологических и синоптических колебаний. Параметры статистического распределения вероятности плотности воздуха связаны с географическими особенностями местности и с особенностями соответствующей розы ветров (на высоте расположения датчиков метеостанции), построенной для выбранного месяца  $m$  и часа  $c$ .

### Проверка согласия гипотетического закона распределения с экспериментальными данными

Проверка гипотез о согласии гипотетических законов распределения с экспериментальными данными выполнена на основе критерия Пирсона и критерия Колмогорова [19, 20]. Статистику критерия Пирсона представим формулой:

$$G_{m,c} = N_{m,c} \cdot \sum_{i=1}^M \frac{\left( (f_{m,c})_i \cdot \Delta\rho - (W_{m,c})_i \right)^2}{(W_{m,c})_i}, \quad (12)$$

где  $N_{m,c}$  — количество учитываемых экспериментальных значений плотности воздуха, входящих в месячно-часовую выборку месяца  $m$  и часа  $c$ ;  $M$  — количество полуинтервалов группирования плотности воздуха;  $(f_{m,c})_i \cdot \Delta\rho = \frac{(Y_{m,c})_i}{N_{m,c}}$  — эмпирическая вероятность попадания значения плотности воздуха в полуинтервал с номером  $i$  в месяце  $m$  в час  $c$ ;  $(W_{m,c})_i$  — теоретическая вероятность попадания плотности воздуха в отрезок с номером  $i$  в месяце  $m$  в час  $c$ .

Величина  $(W_{m,c})_i$  определяется интегралом:

$$(W_{m,c})_i = \int_{\rho_i - \Delta\rho/2}^{\rho_i + \Delta\rho/2} f(\rho; \alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}) d\rho,$$

здесь  $\Delta\rho$  — ширина каждого отрезка градации величины плотности воздуха;  $\Delta\rho = 0,01 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_i$  — плотность воздуха, соответствующая середине  $i$ -го отрезка.

Критическое значение  $\tilde{G}$  статистики критерия Пирсона равно квантилю  $q\chi^2(\tilde{p}, \nu)$  распределения хи-квадрат с доверительной вероятностью  $\tilde{p}$  и числом степеней свободы  $\nu$ , где  $\nu = M - r - 1$ ,  $r$  — число оцениваемых параметров распределения.

Гипотеза о согласии аппроксимационной функции с экспериментальными данными считается подтверждённой, если выполняется условие:

$$G_{m,c} < \tilde{G}_{m,c}. \quad (13)$$

Статистика критерия Колмогорова-Смирнова определяется формулой:

$$G_{m,c} = \sqrt{N_{m,c}} \cdot \sup_{\rho} \left| F_e(\rho) - F(\rho; \alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}) \right|, \quad (14)$$

где  $\sup$  — супремум;  $F_e(\cdot)$  — эмпирическая функция распределения вероятности плотности воздуха, построенная на основе экспериментальных данных температуры, влажности и давления;  $F(\cdot)$  — теоретическая функция распределения вероятности плотности воздуха.

Эмпирическая функция распределения плотности воздуха  $\rho$ , представленной упорядоченной выборкой  $\rho_1 \leq \rho_2 \leq \dots \leq \rho_i \leq \dots \leq \rho_M$ , имеет вид:

$$F_e(\rho) = \begin{cases} 0, & \rho < \rho_1; \\ \frac{1}{N_{m,c}} \cdot \sum_{j=1}^i (Y_{m,c})_j, & \rho_i < \rho < \rho_{i+1}, \quad 1 \leq i \leq M-1. \\ 1, & \rho \geq \rho_M. \end{cases}$$

Теоретическая функция распределения, соответствующая статистической плотности вероятности (9), найдена путём интегрирования выражения (9) по плотности воздуха  $\rho$ . В результате интегрирования (9) получена новая формула:

$$F(\rho; \alpha, \lambda, \xi) = \frac{\left(1 + \exp\left(-\frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)\right)^{k(\alpha)} - \exp\left(-k(\alpha) \cdot \frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)\right)^\alpha}. \quad (15)$$

Величина  $F(\hat{\rho}; \alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c})$  равна вероятности того, что плотность воздуха в месяце  $m$  в час  $c$  не превысит заданную величину  $\hat{\rho}$ , т. е. вероятности того, что  $\rho \leq \hat{\rho}$ .

В случае положительной асимметрии  $k(\alpha) = 1$  и формула (15) приводит к выражению:

$$F_I(\rho; \alpha, \lambda, \xi) = \frac{1}{\left(1 + \exp\left(-\frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)\right)^\alpha}. \quad (16)$$

При отрицательной асимметрии  $S_{m,c} < 0$  получаем  $k(\alpha) = \alpha$  и формула (15) принимает вид:

$$F_{II}(\rho; \alpha, \lambda, \xi) = 1 - \frac{\exp\left(-\alpha \cdot \frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{\rho - \xi}{\lambda}\right)\right)^\alpha}. \quad (17)$$

Функции распределения (15) — (17) нормированы к единице.

Критическое значение  $\tilde{G}$  статистики критерия Колмогорова-Смирнова равно квантилю распределения Стьюдента [19, 20] с доверительной вероятностью  $\tilde{p}$  и числом степеней свободы  $\nu$ . Проверяемая гипотеза считается подтверждённой, если выполняется условие, аналогичное (13).

Доверительная вероятность задана равной  $\tilde{p} = 90\%$ . Согласие экспериментальных распределений, построенных для месячно-часовых выборок, с предложенной формулой (9) подтверждается критериями согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова с указанной доверительной вероятностью. Условие (13) выполняется для всех исследованных экспериментальных месячно-часовых выборок, что подтверждает гипотезу о согласии экспериментальных данных с предложенными статистическими формулами (9) и (15).

### Расчёт вероятности

Вероятность  $U_{m,c}$  того, что плотность  $\rho$  воздуха в заданном месте приземного слоя атмосферы будет принадлежать отрезку  $\rho' \leq \rho \leq \rho''$  в месяце с номером  $m$  в час  $c$  можно найти с помощью интегрального выражения:

$$U_{m,c} = \int_{\rho'}^{\rho''} f(\rho; \alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}) d\rho, \quad (18)$$

где  $\alpha_{m,c}, \lambda_{m,c}, \xi_{m,c}$  — комбинация параметров функции (9), вычисленная для заданного географического места и заданного времени года и суток (месяца с номером  $m$  и часа с номером  $c$ ).

Формулы (9) и (18) могут быть полезны при статистическом прогнозировании плотности воздуха и в статистических моделях (процессов и объектов), в которые входит плотность воздуха в приземном слое атмосферы.

## Выводы

Эмпирические статистические распределения, построенные на основе месячно-часовых выборок плотности воздуха в приземном слое атмосферы, обладают коэффициентами асимметрии и эксцесса, не равными нулю. Гипотеза о нормальности эмпирических распределений плотности воздуха в месячно-часовых выборках плотности воздуха отвергнута с помощью статистического критерия Харке-Бера.

Предложенная аппроксимационная функция (9) содержит три варьируемых параметра и обладает свойством географической универсальности, т. е. может применяться к статистическим распределениям вероятности плотности атмосферного воздуха в приземном слое в различных районах Земли. Географическая универсальность новых формул (9) и (15) проверена для эмпирических статистических распределений вероятности плотности атмосферного воздуха, вычисленной на основе метеорологических данных, полученных в районах с разными типами климата.

Сезонная и суточная универсальность формул (9) и (15) проверена по метеорологическим данным метеостанций аэропортов в разные времена года и суток. Универсальность математической модели статистических распределений вероятности плотности атмосферного воздуха в приземном слое атмосферы достигнута с помощью трёхпараметрических формул (9) и (15). Указанные формулы получены на основе логистических распределений типа I и II в результате введения функции  $k(\alpha)$ , принимающей одно из двух значений в зависимости от знака выборочного коэффициента асимметрии эмпирического распределения вероятности плотности атмосферного воздуха в заданный месяц и час. Гипотеза о соответствии формул (9) и (15) эмпирическим статистическим распределениям плотности воздуха в приземном слое атмосферы подтверждена с помощью критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова для месячно-часовых выборок плотности атмосферного воздуха.

Вероятность того, что плотность воздуха в приземном слое атмосферы будет находиться в заданном диапазоне, можно вычислить с помощью интеграла (18) в результате интегрирования функции (9).

## Список литературы

1. Holton J. R., Hakim G. J. An introduction to dynamic meteorology. 5-th ed. Waltham: Elsevier Academic Press. 2013. 532 p.
2. Achatz U. Atmospheric dynamics. Berlin: Springer Spektrum Berlin, Heidelberg. 2022. 554 p.
3. Gordon M., Li S.-M., Staebler R., et al. Determining air pollutant emission rates based on mass balance using airborne measurement data over the Alberta oil sands operations. // Atmospheric measurement techniques. 2015. No. 8. 3745—3765. DOI: 10.5194/amt-8-3745-2015.
4. Oguz E., Kaya M. D., Nuhoglu Y. Interaction between air pollution and meteorological parameters in Erzurum, Turkey // International Journal of Environment & Pollution. 2003. Vol. 19. No. 3. P. 292—300. DOI: 10.1504/IJEP.2003.003312.
5. Varapongpisan T., Ingsrisawang L., Frank T. D. Taking drift-diffusion analysis from the study of turbulent flows to the study of particulate matter smog and air pollutants dynamics // Condensed Matter Physics. 2019. Vol. 22. №2. P. 24001. DOI: 10.5488/CMP.22.24001.

6. Landberg L. Meteorology for wind energy: An introduction. United Kingdom, Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2016. 205 p.
7. Mathew S., Philip G. S. Advances in wind energy conversion technology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2011. 216 p.
8. Hansen M. O. L. Aerodynamics of wind turbines. 3-rd ed., New York: Routledge Taylor & Francis Group. 2015. 189 p.
9. Gasch R., Twele J. Wind power plants: Fundamentals, design, construction and operation, 2-nd ed., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2012. 550 p.
10. Buck A. L. Model CR-1A hygrometer with autofill. Operating manual. Buck research instruments, LLC. 2012. 26 p.
11. Buck A. L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. // Journal of Applied Meteorology. 1981. Т. 12. V.20. P. 1527—1532.
12. Погода в 241 странах мира: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) (дата обращения: 15.01.2023).
13. Капля Е. В. Параметрическая аппроксимация плотности распределения относительной влажности атмосферного воздуха в условиях континентального климата. // Метеорология и гидрология. 2015. Т. 5. С. 44—51.
14. Айвазян С. А. Енюкова И. С., Мешалкина Л. Д и др. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / Под ред. С. А. Айвазян — М.: Финансы и статистика. 1983. 471 с.
15. Jarque C. M., Bera A. K. A test for normality of observations and regression residuals. // International statistical review. 1987. 55(2). P. 163—172.
16. Teegavarapu R. S. V., Salas J. D., Stedinger J. R. Statistical analysis of hydrologic variables. Methods and applications. Reston: American Society of Civil Engineers, 2019. 552 p.
17. Balakrishnan N., Nevzorov V. B. A primer on statistical distributions. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003. 305 p.
18. Johnson N. L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous univariate distributions, volume 2. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2-nd ed. 1995. 718 p.
19. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Математическая статистика. М.: Высшая школа. 1984. 248 с.
20. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. 2-е изд. испр. М.: Физматлит. 2012. 816 с.

### *References*

1. Holton J. R., Hakim G. J. An introduction to dynamic meteorology. 5-th ed. Waltham: Elsevier Academic Press, 2013: 532 p.
2. Achatz U. Atmospheric dynamics. Berlin: Springer Spektrum Berlin. Heidelberg, 2022: 554 p.
3. Gordon M., Li S.-M., Staebler R., et al. Determining air pollutant emission rates based on mass balance using airborne measurement data over the Alberta oil sands operations. *Atmospheric measurement techniques*. 2015; 8: 3745—3765. DOI: 10.5194/amt-8-3745-2015.
4. Oguz E., Kaya M. D., Nuhoglu Y. Interaction between air pollution and meteorological parameters in Erzurum, Turkey. *International journal of environment & pollution*. 2003; 3 (19): 292—300. DOI: 10.1504/IJEP.2003.003312.
5. Varapongpisan T., Ingsrisawang L., Frank T. D. Taking drift-diffusion analysis from the study of turbulent flows to the study of particulate matter smog and air pollutants dynamics. *Condensed Matter Physics*. 2019; 22(2):24001. DOI: 10.5488/CMP.22.24001.
6. Landberg L. Meteorology for wind energy: An introduction. United Kingdom, Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2016: 205 p.
7. Mathew S., Philip G. S. Advances in wind energy conversion technology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 216 p.
8. Hansen M. O. L. Aerodynamics of wind turbines. 3-rd ed., New York: Routledge Taylor & Francis Group, 2015: 189 p.
9. Gasch R., Twele J. Wind power plants: Fundamentals, design, construction and operation, 2-nd ed., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012: 550 p.



10. Buck A. L. Model CR-1A hygrometer with autofill. Operating manual. Buck research instruments, LLC. 2012: 26 p.
11. Buck A. L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*. 1981, 12 (20): 1527—1532.
12. Weather in 241 countries of the world. Available at: [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) (accessed on: 15.01.2023).
13. Kaplya E. V. Parametric approximation of the probability density function of relative air humidity under conditions of the continental climate. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian meteorology and hydrology*. 2015; 5 (40): (313–318). (In Russ.). DOI: 10.3103/S1068373915050040.
14. Ayvazyan S. A., Enyukova I. S., Meshalkina L. D. *Prikladnaya statistika: Osnovni modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannyih. Spravochnoe izd. = Applied statistics: Fundamentals of modeling and primary data processing. Reference ed.* Moscow: *Finansyi i statistika = Finance and statistics*. 1983: 471 p. (In Russ.).
15. Jarque C. M., Bera A. K. A test for normality of observations and regression residuals. *International statistical review*. 1987. 55(2). P. 163—172.
16. Teegavarapu R. S. V., Salas J. D., Stedinger J. R. Statistical analysis of hydrologic variables. Methods and applications. Reston: American society of civil engineers, 2019: 552 p.
17. Balakrishnan N., Nevzorov V. B. A primer on statistical distributions. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003: 305 p.
18. Johnson N. L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous univariate distributions, volume 2. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2-nd ed. 1995: 718 p.
19. Ivchenko G. I., Medvedev Yu. I. *Matematicheskaya statistika = Mathematical statistics*. Moscow: *Vysshaya shkola = Higher School*, 1984: 248 p. (In Russ.).
20. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. 2-nd ed. Moscow: Physical and mathematical literature. 2012: 816 p. (In Russ.).

### **Информация об авторе**

*Егор Викторович Капля*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение и энергетические системы» Волгоградского государственного аграрного университета, [ev-kaple@yandex.ru](mailto:ev-kaple@yandex.ru).

### **Information about authors**

*Egor Victorovich Kaplya*, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor. Associate professor of the department “Power supply and energy systems” of the Volgograd state agrarian university.

*Статья поступила 28.08.2023*

*Принята в печать 30.11.2023*

*The article was received on 28.08.2023*

*The article was accepted 30.11.2023*

Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 26—43.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):26—43.

Научная статья  
УДК 551.583:504  
doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-26-43

## **Об оценке климатических рисков территории Санкт-Петербурга**

*Артем Александрович Павловский*

НИПЦ Генплана Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, pal@yandex.ru

*Аннотация.* В настоящее время в ответ на ускорение темпов изменения климата и в соответствии с международными обязательствами в Российской Федерации происходят процессы сокращения выбросов парниковых газов и адаптации к изменениям климата на национальном, отраслевом, корпоративном и региональном уровнях. Обоснованием для разработки и ранжирования адаптационных мероприятий по степени их значимости являются результаты комплексного анализа климатических рисков, которым подвержены население, территория и экономика объекта воздействия. В статье рассмотрены особенности оценки климатических рисков для урбанизированных субъектов Российской Федерации на примере Санкт-Петербурга. Приведены уровни опасности климатических рисков, данные о подверженности им территории города, указаны основные места их проявления.

*Ключевые слова:* адаптация, изменения климата, опасность, риск, урбанизированная территория.

*Для цитирования:* Павловский А. А. Об оценке климатических рисков территории Санкт-Петербурга // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 26—43. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-26-43.

Original article

## **On the assessment of the climatic risks of the territory of St. Petersburg**

*Artem A. Pavlovskii*

State Research and Project Center of St. Petersburg Master Plan, St. Petersburg, Russia,  
pal@yandex.ru

*Summary.* Currently, in response to the accelerating rate of climate change and in accordance with international obligations, the processes of mitigation and adaptation to climate change are taking place in the Russian Federation at the national, sectoral, corporate and regional levels. The substantiating material for the development and ranking of adaptation measures according to their degree of importance is the results of a comprehensive analysis of climate risks to which the population, territory and economy of the affected object are exposed.

Using the example of the federal city of St. Petersburg, the article examines the features of assessing climate risks for urbanized subjects of the Russian Federation. The main features of federal cities that need to be taken into account when developing regional plans for their adaptation to climate change are identified. Among them: the only category of land – settlement lands; (lands of settlements); a relatively small area; highly urbanized territory; high population density; concentration of economic sectors, historical and

cultural heritage; the presence of a local change in the natural climatic regime of the territory – the «urban heat island»; features of urban planning activities in accordance with current legislation.

For climate risks, the levels of their danger are given, data on the exposure of the city territory to them, and the main places of their manifestation are described. The article shows that the climatic risks of a very dangerous level for the territory of St. Petersburg are: heat and hurricanes; dangerous level: heavy precipitation; moderately dangerous level: abrasion, processing of the shores of reservoirs, lakes, karst, suffusion, flooding and covering the territory with water, planar and gully erosion, riverbed deformations, heaving, hail, natural fire, the spread of pests and diseases in forests and urban plantations, icing.

*Keywords:* adaptation, climate changes, danger, risk, urbanized area.

*For citation:* Pavlovskii A. A. On the assessment of the climatic risks of the territory of St. Petersburg. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):26—43. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-26-43.

## Введение

Происходящие изменения климата оказывают значительное воздействие на человеческую цивилизацию, наземные и морские экосистемы. При этом на фоне общемировой тенденции к глобальному потеплению региональные особенности климатических изменений и воздействий могут существенно различаться. По данным имеющихся оценок, темпы роста средней температуры приземного воздуха на территории России почти в три, а в ее арктической зоне — в четыре раза превышают общемировые тенденции [1].

В последние годы в развитие декларативной цели Парижского соглашения, принятого постановлением Правительства РФ от 21.09.2019 № 1228, по приспособлению мировой цивилизации к глобальному потеплению в России осуществляется разработка общенационального плана по адаптации к изменениям климата, а также региональных, отраслевых и корпоративных планов.

Согласно Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р, разработка и внедрение мер по сокращению выбросов парниковых газов и приспособлению к изменению климата осуществляются параллельно, и их следует рассматривать как единый комплекс мероприятий по противодействию развитию глобального потепления и его последствий [2].

В соответствии с ГОСТ Р 70528-2022 «Адаптация к изменениям климата. Руководящие указания по планированию процессов принятия решений, связанных с изменением климата» национальная система адаптации направлена как на смягчение последствий изменения климата, так и на использование благоприятных возможностей, связанных с ними.

Несмотря на то, что в настоящее время еще не все субъекты РФ произвели разработку и утверждение региональных планов адаптации, осуществляется уже второй этап Национального плана мероприятий адаптации к изменениям климата на период до 2025 года, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 11.03.2023 № 559-р. В рамках второго этапа на региональном уровне запланирована актуализация планов адаптации к изменению климата. На способность адаптации к изменениям климата таких сложных систем, как субъекты РФ, будут

оказывать различное влияние политические, экономические, социальные, технологические, правовые, градостроительные, экологические факторы. При этом успешное сценарное планирование адаптации различных российских территорий не представляется возможным без сбора, анализа и оценки информации о существующих и прогнозируемых климатических рисках для них.

В связи с тем, что многообразие ландшафтов и отраслей экономики России не позволяет детально в рамках одной статьи рассмотреть особенности оценки климатических рисков для них в целом, представленное исследование посвящено анализу характеристик подготовки региональных планов адаптации для специфических высокоурбанизированных субъектов РФ, к которым относится город федерального значения Санкт-Петербург. Основным предметом исследования данной статьи являются климатические риски для территории Санкт-Петербурга.

### **Исходные данные**

Региональные планы адаптации к изменениям климата являются нормативными документами, утверждаемыми высшими исполнительными органами государственной власти в субъектах Российской Федерации, поэтому оценка климатических рисков территории, определение пороговых значений их воздействия и разработка мероприятий по приспособлению к ним производятся согласно действующим Методическим рекомендациям и показателям по вопросам адаптации к изменениям климата, утвержденным приказом Минэкономразвития России от 13.05.2021 № 267 (далее — Методические рекомендации).

При оценке климатических рисков и уязвимостей территории, разработки адаптационных мероприятий, их интеграции в документы стратегического планирования и оперативную деятельность исполнительных органов государственной власти различного уровня используются методологические подходы, представленные в ГОСТ Р ИСО 14091-2022 «Адаптация к изменениям климата. Руководящие указания по оценке уязвимостей, воздействия и риска»; ГОСТ Р 70531-2022/ISO/TS 14092:2020 «Адаптация к изменениям климата. Требования и руководство по планированию адаптации для органов местного самоуправления и сообществ».

Получение обоснованных результатов по оценке климатических рисков для территории различных субъектов Российской Федерации требует комплексного анализа различных пространственных, градостроительных, экономических, социальных и экологических данных.

На примере Санкт-Петербурга можно отметить, что в дополнение к исходной информации, представленной в действующих Методических рекомендациях, для оценки климатических рисков урбанизированной территории необходимо привлечение дополнительных специализированных данных. Для городов федерального значения важнейшей исходной информацией являются документы территориального планирования и градостроительного зонирования, а также утвержденная документация по планировке территории.

Основная градостроительная информация может быть получена в материалах генерального плана города, автоматизированной информационной системе

управления градостроительной деятельностью (АИС УГД) или региональной геоинформационной системе (РГИС) (<https://portal.kgainfo.spb.ru/kgamap>; <https://www.rgis.spb.ru/>).

В качестве источника информации о состоянии окружающей среды объекта климатического воздействия может быть выбран экологический паспорт территории, разрабатываемый в соответствии с Федеральным законом от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Картографические сервисы экологического паспорта Санкт-Петербурга представлены на официальном сайте Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности (<https://www.infoeco.ru/>).

Несмотря на необходимость выполнения оценок климатического воздействия на природные системы и объекты, в действующих нормативных документах отсутствует указание на необходимость сбора данных об особо охраняемых природных территориях и участках территорий, в отношении которых предполагается провести комплексные экологические обследования. Кроме того, для городов, помимо данных о лесах, важным представляется сбор сведений о зеленых насаждениях общего пользования. Вышеуказанные сведения могут быть получены из АИС УГД, РГИС, на экологическом портале Санкт-Петербурга (<https://www.infoeco.ru/>), на официальном сайте Дирекции особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга (<https://oopt.spb.ru/>) или из приложений к Закону Санкт-Петербурга от 08.10.2007 № 430-85 «О зеленых насаждениях общего пользования».

В контексте обсуждения проблемы сбора исходных данных, необходимых для разработки регионального плана адаптации города федерального значения к изменениям климата, в том числе при расчете ущерба от воздействий различных природных факторов, необходимо поднять вопрос сбора статистики о зафиксированном вреде физическим или юридическим лицам, объектам или отраслям хозяйства, окружающей среде в результате опасного гидрометеорологического явления. Целесообразно, чтобы данная информация собиралась, накапливалась и систематизировалась на уровне исполнительных органов государственной власти, главных управлений МЧС России по субъектам РФ, территориальных органов и управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета.

Без данных о зафиксированном ущербе от опасных природных явлений за исторический климатический период, например, с 1991 г. по 2020 г., крайне затруднительно определить региональные показатели адаптации в части определения числа пострадавших лиц, экономических убытков, затрат на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций.

Еще более остро строит проблема со сбором и обобщением статистических данных о ежедневных смертях, вызовах скорой помощи, занятых койко-местах пациентами с метеозависимостью. Дополнительно, необходима разработка и/или утверждение карты плотности городского населения и сбор сведений о суточной миграции населения. Отсутствие этих сведений существенно затрудняет прогнозирование последствий потепления климата для здоровья и среды обитания

человека. Например, в части развития климатического риска «жара» на высокоурбанизированных территориях [3].

При оценке климатических рисков, обусловленных изменением количества и интенсивности атмосферных осадков, при адаптации систем водоотведения к ним, необходим сбор данных о структуре и бассейнах канализования, местоположении очистных сооружений поверхностного стока, стационарных снегоприемных и снегоплавильных пунктов. Данная информация может быть получена на официальном сайте городского водоканала (<https://www.vodokanal.spb.ru/>). Приведенный анализ исходных данных показывает необходимость актуализации действующих нормативных документов, определяющих разработку планов адаптации к изменениям климата, прежде всего, методических рекомендаций в данном направлении. Именно этой задаче и посвящена настоящая работа.

### **Методы исследования**

Как уже было указано выше, в настоящее время оценка климатических рисков территории в целях разработки регионального плана адаптации к изменениям климата осуществляется в соответствии с утвержденными Методическими рекомендациями по оценке климатических рисков, утвержденных приказом Минэкономразвития России от 13.05.2021 г. № 267. В соответствии с принятым Межправительственной группой экспертов по изменению климата подходом под климатическим риском подразумевается произведение вероятности гидрометеорологического или геофизического явления на вероятность уязвимости населения, объектов народного хозяйства и природных экосистем, которые могут оказаться подверженными этой опасности [4].

Согласно Федеральному закону от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», экологический риск — вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера. Вероятно, в целях исключения разночтений, целесообразно сбалансировать действующее климатическое и напрямую связанное с ним экологическое российское законодательство, в части прихода к единым определениям.

Несмотря на то, что рекомендуемые градации некоторых климатических рисков не вполне отражают значимость опасных природных явлений для развития субъекта РФ, в данной статье уровни их воздействия определены на основании критериев, представленных в Приложении № 3 к Методическим рекомендациям.

Например, оценка уровня опасности риска «наводнение» производится на основе следующих факторов: «подверженность территории» (%), продолжительность проявления (сут), скорость развития (м/сут). В настоящее время в утвержденную зону затопления попадает примерно 3,3 % территории города, максимальная продолжительность явления — 2 суток, зафиксированная скорость подъема уровня воды — около 3–5 м/сут для побережья Финского залива, не защищенного Комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, и 0,5–1,0 м/сут —



для Невской губы. По представленным в Методических рекомендациях критериям климатический риск «наводнение» оценивается как «умеренно-опасный» для территории г. Санкт-Петербурга, хотя значение данного явления для города намного значительнее (<https://dambaspb.ru/>).

Тоже можно отметить и в отношении риска «абразия»: при средних скоростях 0,05–1,8 м/год данный риск является «умеренно опасным» для Санкт-Петербурга согласно Методическим рекомендациям. При этом реализация Генеральной схемы берегозащиты Санкт-Петербурга — одно из наиболее значимых природоохранных мероприятий в материалах нового Генерального плана Санкт-Петербурга [5, 6, 7, 8, 9].

### Результаты исследований

В качестве объекта исследования был выбран Санкт-Петербург — субъект Российской Федерации, город федерального значения. Информация об уровнях опасности климатических рисков является основой для подготовки регионального плана адаптации к изменениям климата. Оценка климатических рисков осуществлялась на основе комплексного подхода, предусмотренного Методическими рекомендациями, по источникам их возникновения:

— атмосфера: очень сильный ветер (в том числе ураган, шквал, смерч), засуха, заморозки, аномальная жара (холод), крупный град, аномальные атмосферные осадки, грозы, чрезвычайно высокая пожарная опасность и другие;

— гидросфера: наводнение (вследствие половодья, паводка, затора, зажора, сильного ливня), русловые деформации, повышение уровня Мирового океана и другие;

— криосфера и литосфера: лавины, оползни, сели (включая гляциальные), абразия, переработка берегов (рек, водохранилищ, озер), эрозия плоскостная и овражная, водоснежные потоки, деградация многолетней мерзлоты, термоабразия, термоэрозия овражная, термокарст, пучение, солифлюкция, наледеобразование, карст, суффозия, просадочность лессовых пород, подтопление территории и другие.

Категории опасности климатических рисков были определены по ретроспективным данным об интенсивности, распространенности и продолжительности их воздействия. При обосновании регионального плана адаптации были установлены участки территории Санкт-Петербурга, где происходит взаимодействие объекта воздействия с опасным уровнем климатических факторов и имеются данные о продолжительности этого контакта.

В границах г. Санкт-Петербурга благодаря его приморскому положению, геологическому строению и истории, подверженности опасным гидрометеорологическим и другим природным воздействиям выделено семнадцать климатических рисков различного уровня опасности, которые были рассмотрены на заседании Экологического совета при Губернаторе Санкт-Петербурга и включены в Региональный план адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата, утвержденный распоряжением Правительства Санкт-Петербурга от 21.12.2023 № 25-рп (см. Таблицу 1; <https://www.gov.spb.ru/press/governor/255644/>).

Таблица 1

Характеристика климатических рисков территории Санкт-Петербурга  
 Characteristics of the climatic risks of the territory of St. Petersburg

№	Показатель риска	Подверженность территории города	Уровень опасности
1	Жара	Территория исторически сложившихся городских районов, зоны многоэтажной и среднеэтажной многоквартирной застройки, промышленные зоны, покрытия улично-дорожной сети, крыши, ограждающие конструкции зданий. Уязвимые группы населения: дети, пожилые люди, беременные женщины, бездомные, люди с различными заболеваниями, инвалиды, работники на открытом воздухе, сотрудники служб экстренного реагирования, заключенные, малообеспеченные слои населения, спортсмены.	Весьма опасный
2	Ураганы, смерчи, сильный ветер	Зеленый фонд Санкт-Петербурга, улично-дорожная сеть, остекленные различных зданий, сооружений, транспортных средств, элементы благоустройства (цветочное оформление садов и парков, древесные, кустарниковые растения, вывески, навесы, наружная информация, указатели); Большой порт Санкт-Петербург.	Весьма опасный
3	Сильные атмосферные осадки	Общесплавная и раздельная хозяйственно-бытовая и дождевая системы водоотведения Санкт-Петербурга, снегоприемные пункты, снегоплавильные станции. Наиболее подвержены отдельные участки улично-дорожной сети города: – в Приморском районе (перекресток Парашютной ул. и ул. Репищева; перекресток пр. Королёва и Долгоозёрной ул.; перекресток пр. Испытателей и Коломяжского пр.); – в Выборгском районе (перекресток пр. Энгельса и пр. Луначарского; перекресток пр. Просвещения и ул. Есенина; перекресток пр. Энгельса и пр. Испытателей); – в Калининском районе (перекресток пр. Просвещения и ул. Ушинского; перекресток ул. Жукова и Феодосийской ул.); – в Центральном районе (Смольная наб. от Водопроводного пер. до Смольной ул.; Синопская наб. (под путепроводом Херсонской ул.); Лиговский пр. на углу с Воздухоплавательной ул. под ж/д мостом; Рыбинская ул. на пересечении с наб. Обводного канала); – в Невском районе (ул. Тельмана на участке от д. 41 до д. 32); во Фрунзенском районе (проезд под Алмазными мостами по ул. Салова и Благодатной ул.); – в Кировском районе (ул. Лёни Голикова на пересечении с пр. Стачек).	Опасный
4	Оползни	Проявляются на склонах долин рек и откосах каналов. Были отмечены на р. Кузьминке в Пушкинском районе. Развитие оползневых процессов прогнозируется на территории Василеостровского, Красногвардейского и Невского районов.	Умеренно опасный
5	Абразия	Абразионные берега в северной береговой зоне Невской губы (Курортный, Кронштадтский, Приморский районы) составляют более 70 % от их общей протяженности. Пляжи Курортного района (ценный рекреационный ресурс города) в той или иной степени подвержены размыву. Средние скорости отступания берега составляют 50 см/год, максимальные — 2 м/год.	Умеренно опасный



№	Показатель риска	Подверженность территории города	Уровень опасности
6	Переработка берегов водохранилищ, озер	Берега Ижорского, Охтинского и Сестрорецкого водохранилищ и других гидротехнических сооружений города.	Умеренно опасный
7	Карст	Часть территории Красносельского, Пушкинского районов Санкт-Петербурга, где развиты карбонатные породы ордовикского возраста.	Умеренно опасный
8	Суффозия	Проявляется на отдельных участках в береговых зонах рек Большой, Средней и Малой Невки.	Умеренно опасный
9	Подтопление территории	Напорные воды верхнего межморенного водоносного горизонта, распространенного на территории города локально, представляют потенциальную опасность с точки зрения подтопления на участках с высоким пьезометрическим уровнем. Водоносный горизонт грунтовых вод развит на территории Санкт-Петербурга повсеместно и характеризуется высоким уровнем стояния грунтовых вод. На большей части территории уровень залегания грунтовых вод находится на глубине от 0,0 до 1,0 м, что, в определенных условиях, может привести к подтоплению заглубленных сооружений. Наиболее подвержены северная и центральная части города.	Умеренно опасный
10	Эрозия плоскостная и овражная	Появляется на территории Красносельского, Пушкинского, Колпинского, Петродворцового Курортного районов Санкт-Петербурга.	Умеренно опасный
11	Русловые деформации	Проявляется на берегах р. Малой Невы, р. Большой Ижоры.	Умеренно опасный
12	Пучение	Данному климатическому риску наиболее подвержена улично-дорожная сеть в северной и центральной частях Санкт-Петербурга.	Умеренно опасный
13	Обледенение	Улично-дорожная сеть, крыши зданий, наружные инженерные сети, элементы благоустройства, древесная и кустарниковая растительность.	Умеренно опасный
14	Наводнение (вследствие половодья, затора, зажора, катастрофического ливня)	На территорию Санкт-Петербурга оказывают негативное воздействие Финский залив, Невская губа, река Нева, озеро Сестрорецкий разлив, озеро Лахтинский разлив, грунтовые воды. Наиболее уязвимы к наводнениям низинные приморские территории, жилые, общественные, промышленные, инженерные объекты, пляжи, попадающие в границы зоны затопления; функционирование Большого порта Санкт-Петербург.	Умеренно опасный
15	Град	Остекление различных зданий, сооружений, транспортных средств, элементы благоустройства (цветочное оформление садов и парков, древесные, кустарниковые растения, вывески, навесы, наружная информация, указатели).	Умеренно опасный
16	Пожарная опасность в лесах	Леса Курортного лесопарка Санкт-Петербурга и Морозовского лесничества Минобороны России.	Умеренно опасный
17	Распространение вредителей и болезней в лесах и городских насаждениях	Зеленый фонд Санкт-Петербурга.	Умеренно опасный

Следует отметить, что в последний климатический период отмечается рост уровня опасности жары, поскольку увеличивается, как продолжительность, так и повторяемость данного опасного метеорологического явления. Например, в последнее тридцатилетие количество случаев продолжительной жары почти в три раза превосходит аналогичные значения для предыдущего климатического периода (см. табл. 2). Абсолютные максимальные температуры приземного воздуха за весь период наблюдений также были зафиксированы именно в текущем периоде — в июле 2010 года + 37,1 °С. (<http://www.meteo.nw.ru/>).

В соответствии с РД 52.88.699-2008 Росгидромета «Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения опасных природных явлений» и утвержденным Перечнем опасных гидрометеорологических явлений и их критериев по Санкт-Петербургу (<http://www.meteo.nw.ru/>) продолжительная жара (май—август) — это положительные аномалии от нормы среднесуточных температур воздуха по Санкт-Петербургу на 7 градусов и более в течение 5 суток и более; сильная жара (май—август) — максимальная температура воздуха +35 °С и выше.

Таблица 2

Сведения о случаях продолжительной жары, произошедших на территории Санкт-Петербурга с 1960 г. по 2022 г.

Information about the cases of heat wave that occurred on the territory of St. Petersburg from 1960 to 2022

Год	Количество случаев	Суммарная продолжительность, дни	Дата начала	Дата окончания	Максимальное отклонение среднесуточной температуры воздуха от пороговой, °С
1972	2	15	25 июня	4 июля	3,8
			19 августа	23 августа	2,8
1973	1	5	3 июля	7 июля	2,9
1977	1	5	12 июня	16 июня	2,7
1980	1	6	28 июля	2 августа	0,4
1988	1	7	13 июля	19 июля	3,6
2003	1	11	25 июля	4 августа	4,4
2004	1	5	3 августа	7 августа	1,1
2006	1	7	7 июля	13 июля	4,8
2007	1	9	8 августа	16 августа	4,1
2010	3	25	5 июля	19 июля	6,8
			25 июля	29 июля	7
			6 августа	10 августа	7,7
2011	2	10	8 июля	12 июля	2
			19 июля	23 июля	3,9
2014	1	17	26 июля	11 августа	4,5
2018	2	23	12 июля	20 июля	3,7
			22 июля	4 августа	2,9
2021	2	25	18 июня	27 июня	7,9
			4 июля	18 июля	6,2

Год	Количество случаев	Суммарная продолжительность, дни	Дата начала	Дата окончания	Максимальное отклонение среднесуточной температуры воздуха от пороговой, °С
2022	2	15	26 июня 15 августа	4 июля 20 августа	4,4 3,4

На рис. 1 представлены данные об изменении количества дней с температурой воздуха выше  $+30^{\circ}\text{C}$ , в которых наблюдается значимый положительный тренд. Наибольшие значения в 17–20 дней наблюдались в период продолжительной жары.

Следует отметить, что, согласно Атласу смертности и экономических потерь в результате экстремальных метеорологических, климатических и гидрологических явлений ВМО, жара 2010 года в России по числу человеческих жертв (55 736) явилась крупнейшим бедствием в Европе за период с 1970 г. по 2019 г. (<https://library.wmo.int/idurl/4/43116>).

Повышение средней и максимальной температуры приземного воздуха, увеличение повторяемости случаев «жары» приводят к необходимости изменения подходов к проектированию жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге. В целях защиты здоровья населения в текущих климатических условиях необходимо не только применение архитектурно-строительных мероприятий по теплозащите зданий в холодный период года, но и по защите их и прилегающих к ним территорий от перегрева летом.

Несмотря на то, что влияние жары распространяется на всю территорию г. Санкт-Петербурга, степень ее воздействия различна. В совокупности с эффектом «городского острова тепла» градостроительные и социально-экономические показатели городской территории определяют ее уязвимость к данному опасному метеорологическому явлению. В связи с этим исполнительным органам

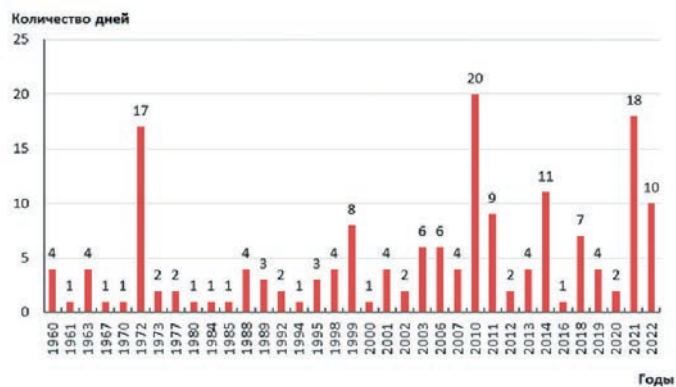


Рис. 1. Количество дней с температурой воздуха выше  $+30^{\circ}\text{C}$  в Санкт-Петербурге.

Fig. 1. The number of days with an air temperature above  $+30^{\circ}\text{C}$  in St. Petersburg.

государственной власти Санкт-Петербурга необходимо сосредоточиться на разработке и реализации мероприятий по адаптации города к климатическому риску «жара», особенно с учетом прогнозов развития глобального потепления.

Высоким риском перегрева характеризуются промышленные и инженерно-транспортные территории города, где широко используются металлические кровли, отсутствуют зеленые насаждения и повсеместно «запечатана» почва. Для таких объектов при реконструкции следует использовать так называемые «холодные» кровли с высоким альбедо поверхности. Необходимо озеленение и снижение площадей «запечатанных» территорий.

Согласно СП 82.13330.2016 «СНиП III-10-75 Благоустройство территорий», для предотвращения перегрева поверхностей летом рекомендуется использовать материалы с высокой отражательной способностью. В рамках текущего ремонта крыш рекомендуется использовать только «холодные» покрытия. В этом случае в течение одного амортизационного периода металлических кровель будет произведена их замена на «холодные». Также можно рекомендовать производить текущую замену дорожного покрытия на покрытия, содержащие битумы с более высокой температурой размягчения.

Особенно рекомендуется обратить внимание на ситуацию с реновацией или капитальным ремонтом пятиэтажек («хрущевок»). Полученные в данном исследовании оценки экономического ущерба от преждевременной смертности, вызванной перегревом, позволяют соотнести эти ущербы с затратами: на ускоренное озеленение дворовых территорий в новостройках; применение «холодных» кровель и «холодных» отделочных материалов фасадов зданий [3].

Утвержденным Региональным планом предусмотрен ряд мероприятий по адаптации к данному новому для Санкт-Петербурга климатическому риску «жара»:

- адаптация к изменениям климата в сфере здоровья населения (п. 7.1);
- развитие водно-зеленого каркаса Санкт-Петербурга (п. 7.2);
- адаптация функционально-планировочной структуры Санкт-Петербурга к развитию на его территории «городского острова тепла» (п. 7.5);
- адаптация к изменениям климата в сфере строительства (п. 7.6);
- адаптация к изменениям климата в сфере комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры, энергетики и энергосбережения в Санкт-Петербурге (п. 7.7);
- адаптация к изменениям климата в сфере транспорта (п. 7.17);
- работы по противопожарному обустройству городских лесов, мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров (п. 7.21).

В период проявления опасного метеорологического явления «жара» при планировке территории высокоплотной жилой и общественно-деловой застройки, ее благоустройстве и архитектурно-строительном проектировании объектов капитального строительства целесообразно стремиться к максимально возможному озеленению, проветриванию и увеличению площади пронизываемых поверхности. Рекомендуется размещение ажурных древесно-кустарниковых конструкций, навесов светлого цвета, создающих тень вдоль перегретых участков улично-дорожной сети и на автомобильных стоянках. При благоустройстве территории,

создании малых архитектурных форм рекомендуется применение светлых материалов с коэффициентом альбедо не менее 0,3. В общественных пространствах, на детских площадках целесообразно размещать сухие фонтаны, адиабатические системы увлажнения и иные водные устройства.

Дополнительно следует отметить, что при рассмотрении воздействия климатических рисков на меньшие территориальные единицы, например, на административные районы или муниципальные образования, уровни их опасности и, соответственно, значимость для градостроительного развития могут существенно отличаться от общегородских. Актуальным это является для оценки уровней опасности таких климатических рисков, как наводнение и затопление, абразия в приморской зоне Санкт-Петербурга [10, 11, 12].

Обратимся к оценке влияния климатических рисков на территорию Приморского района и его муниципальных образований: муниципальный округ №65, муниципальный округ Лахта-Ольгино, муниципальный округ Ланское, муниципальный округ Комендантский аэродром, муниципальный округ Озеро Долгое, муниципальный округ Юнтолово, муниципальный округ Коломяги, поселок Лисий Нос. Приморский район является одним из крупнейших районов Санкт-Петербурга, его площадь составляет 109,87 км<sup>2</sup>. По численности населения и по естественному приросту населения (около 700 тыс. чел.) Приморский район занимает первое место в городе ([https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg\\_primorsk/](https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg_primorsk/)). Располагаясь на северо-западе Санкт-Петербурга, район представляет собой переходную зону между исторически сложившейся застройкой города и его курортной частью. Основными факторами, определяющими микроклиматические особенности района, являются его географическое положение, характер рельефа, наличие водоемов, массивов зеленых насаждений, функционально-планировочная структура урбанизированных территорий. Адвекция тепла и влаги с акватории Восточной части Финского залива на Литориновую аккумулятивную террасу определяет температурно-влажностный режим побережья района.

Значительная часть территории района (половина муниципальных образований) непосредственно граничит с акваторией Невской губы Финского залива. Несмотря на то, что естественный рельеф и растительность района существенно преобразованы, в нем расположены защитные (городские) леса Приморского, Песочинского лесничеств Курортного лесопарка Санкт-Петербурга и Морозовского лесничества Минобороны России (<https://lesopark-spb.ru/>; <https://ulhip.mil.ru/Filiali/Morozovsk>), четыре государственных особо охраняемых природных территории регионального значения: природные заказники «Юнтоловский», «Северное побережье Невской губы», «Новоорловский» и памятник природы «Петровский пруд». В связи с этим климатический риск распространения вредителей и болезней в лесах и городских насаждениях достигает в границах Приморского района опасного уровня, а в некоторых муниципальных образованиях и весьма опасного уровня (см. табл. 2).

Кроме того, значительная часть района занята высоко урбанизированными участками многоэтажной и среднеэтажной жилой застройки. В муниципальном округе «Лахта-Ольгино» находится уникальный высотный комплекс «Лахта

Центр», состоящий из нескольких небоскребов (<https://lakhta.center/>). Высокая численность и плотность населения, наблюдающиеся тенденции на их увеличение, градостроительные планы по размещению крупных жилых и общественно-деловых комплексов, приводят к высокой подверженности района климатическому риску «жара» (см. табл. 2).

На рис. 2—3 представлены сравнительные графики различных метеорологических параметров, построенных по данным наблюдений на ОГМС Санкт-Петербург и МГ-2 Лисий Нос и показывающих микроклиматические особенности районов их размещения.

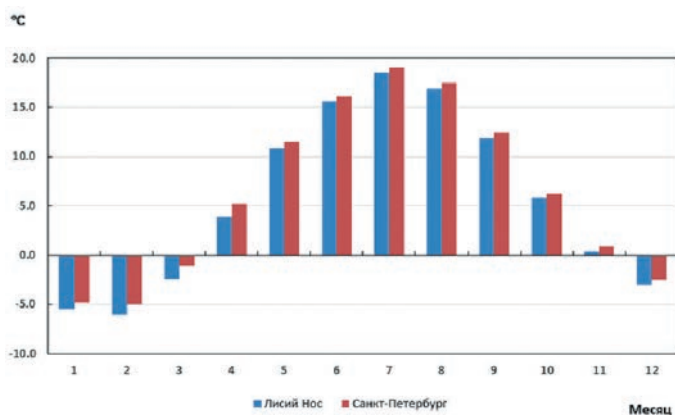


Рис. 2. Средняя многолетняя месячная температура воздуха (1991—2020 гг.) на станциях Лисий Нос и Санкт-Петербург.

Fig. 2. Average long-term monthly air temperature (1991—2020) according to MG-2 Lisiy Nos and OGMS St. Petersburg.

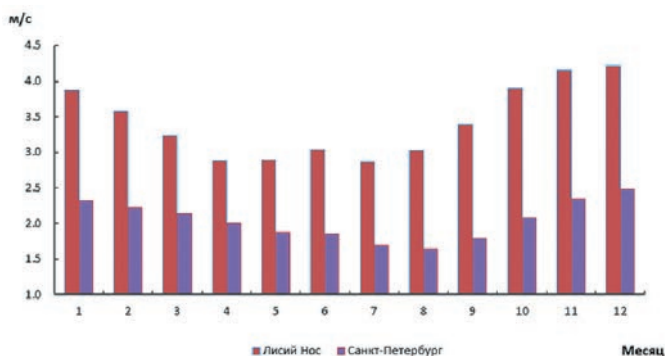


Рис. 3. Средняя многолетняя месячная скорость приземного ветра (1991—2020 гг.) на станциях Лисий Нос и Санкт-Петербург.

Fig. 3. Average long-term monthly surface wind velocity (1991—2020) at the stations Lisiy Nos and St. Petersburg.

Средняя многолетняя температура приземного воздуха за период с 1991 г. по 2020 г. на станции Лисий Нос составляет 5,6 °С, а на станции Санкт-Петербург — 6,3 °С. Средняя многолетняя скорость ветра за период с 1991 г. по 2020 г. на станции Лисий Нос составила 3,4 м/с, на станции Санкт-Петербург, расположенной вблизи многоэтажной многоквартирной застройки, — 2 м/с.

Около 1707,1 га территории района попадает в зону затопления, внесенную в Единый государственный реестр недвижимости: 1013,8 га — в муниципальном округе «Лахта – Ольгино», 331,8 га — в поселке Лисий Нос, 288,4 га — в муниципальном округе «Юнтолово», 48,2 га — в муниципальном округе «№65», 24,9 га — в муниципальном округе «Коломяги». Климатический риск «наводнение» достигает весьма опасного значения на территории поселка Лисий Нос (ему подвержено 42 % территории) и муниципального образования «Лахта – Ольгино» (ему подвержено 33 % территории). В целом для территории всего Приморского района данный риск характеризуется опасным уровнем воздействия.

Например, 18 февраля 2020 года во время остановленного наводнения был поврежден пляж «Морские дубки» в Лисьем Носу. В результате наводнений, произошедших во второй декаде октября 2023 года, два из которых (12.10.2023 — +212 см БС; 15.10.2023 — +222 см БС), по имеющимся оценкам были «особо опасными», существенно пострадал пляж Парка имени 300-летия Санкт-Петербурга (<https://dambaspb.ru/flood>).

Региональным планом адаптации Санкт-Петербурга к изменению климата предусмотрен ряд мероприятий по защите городского побережья от разрушения: п. 7.10 «Корректировка границ зон затопления, подтопления Санкт-Петербурга», п. 7.14 «Создание системы берегозащиты Санкт-Петербурга». Кроме того, перед Санкт-Петербургом стоит задача по восстановлению нарушенных естественных берегов водных объектов на его территории. Например, вопросам ревитализации реки Охты и ее берегов был посвящен архитектурно-градостроительный конкурс «Ресурс периферии», организованный Комитетом по градостроительству архитектуре в 2020 г. — 2021 г. (<https://kgainfo.spb.ru/архитектурно-градостроительный-конк/>).

Таблица 3

Количественные показатели интенсивности, распространённости и продолжительности воздействия климатических рисков в границах муниципальных образований Приморского района

Results of the assessment of climate risks within the boundaries of municipalities of the Primorsky district

Риск	Муниципальное образование Приморского района							
	Лахта-Ольгино	№ 65	Ланское	Комендантский аэродром	Озеро Долгое	Юнтолово	Коломяги	Лисий Нос
Жара	ВО	ВО	ВО	ВО	ВО	УО	УО	ВО
Ураганы, смерчи, сильный ветер	О	О	О	О	О	О	О	О
Сильные атмосферные осадки	О	О	О	О	О	О	О	О



Риск	Муниципальное образование Приморского района							
	Лахта-Ольгино	№ 65	Ланское	Комендантский аэродром	Озеро Долгое	Юнтолово	Коломяги	Лисий Нос
Абразия	УО	УО	–	–	–	–	–	УО
Переработка берегов водохранилищ, озер	УО	УО	–	–	УО	УО	УО	–
Наводнение	ВО	УО	–	–	–	О	–	ВО
Подтопление	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО
Эрозия плоскостная и овражная	–	–	–	УО	–	УО	УО	–
Русловые деформации	УО	УО	УО	УО	–	УО	УО	–
Пучение	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО
Град	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО
Пожарная опасность в лесах	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО	УО
Распространение вредителей и болезней в лесах и городских насаждениях	ВО	УО	ВО	УО	ВО	ВО	УО	ВО

Условные обозначения: ВО – весьма опасный, О – опасный, УО – умеренно опасный уровни.

В связи с наблюдающимся повышением среднего уровня моря в Финском заливе, увеличением повторяемости морских нагонных наводнений без проведения специальных берегозащитных мероприятий климатический риск «абразия» может достигнуть опасного, а при реализации экстремальных сценариев изменения климата на некоторых участках побережья и весьма опасного уровня [8, 13], что способно повлиять на сохранность сотен и даже тысяч объектов капитального строительства и историко-культурного значения [10] (<http://cliplive.infoeco.ru/index.php?id=16>).

Именно с учетом высокого значения пляжей, особенно курортного побережья, для развития туристического и лечебно-оздоровительного потенциала города проекты по созданию системы берегозащиты Санкт-Петербурга и благоустройству прибрежной рекреационной зоны с учетом климатических изменений были выбраны, разработаны и успешно защищены Санкт-Петербургской командой в рамках Всероссийской проектно-образовательной программы «Адаптация регионов России к изменениям климата — 2023», организованной Агентством стратегических инициатив и Российским экономическим университетом им. Г. В. Плеханова ([https://asi.ru/government\\_officials/nei/climate-adaptation-education/](https://asi.ru/government_officials/nei/climate-adaptation-education/)).

Приспособлению к климатическому риску «сильные атмосферные осадки» посвящено мероприятие по адаптации систем водоотведения Санкт-Петербурга к условиям повышения интенсивностей и частоты выпадения атмосферных осадков, связанных с изменением климата (п. 7.9) Регионального плана. В рамках



данного мероприятия планируется развитие, в том числе зеленой инфраструктуры по водоотведению — размещение биодренажных канав, дождевых садов, сохранение водно-болотных угодий.

### Выводы

При научном обосновании материалов регионального плана адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата была выполнена системная работа по сбору, обработке и анализу имеющейся информации о воздействии на территорию, население и экономику города различных климатических рисков. По результатам выполненного исследования можно сделать вывод, что действующее российское законодательство по данной тематике целесообразно дополнить исходными данными и требованиями, характерными для городов федерального значения.

Следует отметить, что урбанизированные субъекты Российской Федерации: Санкт-Петербург, Москва и Севастополь имеют ряд основных особенностей, которые необходимо учитывать при формировании системы оперативных и долгосрочных адаптационных мер, реализуемых на региональном уровне.

В границах указанных субъектов имеется только одна категория земель — поселения; в них действует особый порядок осуществления градостроительной деятельности согласно Статье 63 Градостроительного кодекса РФ; плотность населения, концентрация отраслей экономики, историко-культурного наследия на порядок и более превосходят аналогичные значения в соседних с ними областях и республиках; климатический режим урбанизированной территории, для которого характерным является наличие «городского острова тепла», существенно отличается от окружающей местности.

В связи с этим в перечень исходной информации, используемой для оценки климатических рисков на урбанизированных территориях, следует включить действующие генеральные планы и правила землепользования и застройки городов; сведения из автоматизированной информационной системы управления градостроительной деятельностью; данные о зеленых насаждениях общего пользования и особо охраняемых природных территориях, плотности населения и о суточной смертности.

Кроме того, необходимо производить организацию сбора, обработки и накопления специальной информации о фактическом ущербе (экономическом и неэкономическом) от климатических рисков (опасных природных явлений).

### Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. / Под ред. В. М. Катцова. Росгидромет. Санкт-Петербург: Научное издание технологий, 2022. 676 с.
2. Порфирьев Б. Н., Терентьев Н. Е., Зинченко Ю. В. Планирование адаптации к изменениям климата: мировой опыт и возможности для устойчивого социально-экономического развития России // Проблемы прогнозирования. 2023. № 2 (197). С. 154—168. DOI: 10.47711/0868-6351-197-154-168.

3. Крицук С. Г., Горный В. И., Латыпов И. Ш. и др. Спутниковое картирование риска перегрева поверхности городской среды (на примере Санкт-Петербурга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 5. С. 34—44.
4. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. / Под ред. В. М. Катцова. Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. Санкт-Петербург. 2017. 106 с.
5. Геологический атлас Санкт-Петербурга. / Под ред. Н. Б. Филиппова. Санкт-Петербург. Камилъфо, 2009. 57 с.
6. Филиппов Н. Б., Серебрицкий И. А. Генеральная схема берегозащиты Курортного района // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2016. №1 (1) сентябрь 2016 г. С. 22—29.
7. Divinsky B. V., Kosyan R. D., Ryabchuk D. V., Sergeev A. Y. Development of the sandy coast: hydrodynamic and morphodynamic conditions (on the example of the Eastern gulf of Finland) // *Oceanologia*. Volume 63, Issue 2, April-June 2021, P. 214—226. DOI: 10.1016/j.oceano.2020.12.002.
8. Рябчук Д. В., Сергеев А. Ю., Ковалева О. А. и др. Проблемы абразии берегов Восточной части Финского залива: состояние, прогноз, рекомендации по берегозащите // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 187—203.
9. Геологические и экологические риски Санкт-Петербурга. Практические рекомендации по адаптации к климатическим изменениям (CLiPLivE). Санкт-Петербург, 2014. 82 с.
10. Павловский А. А., Шамшурин В. И. Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 681—693.
11. Павловский А. А. О разработке и реализации первоочередных мер по адаптации Санкт-Петербурга к климатическим изменениям // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 111—126.
12. Павловский А. А. Об адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № 1 (55). С. 139—151.
13. Павловский А. А. 2016. Об определении зон затопления на территории Санкт-Петербурга // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С. 39—50.

### *References*

1. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Edited by V. M. Kattsov. *Rosgidromet. Sankt-Peterburg: Naukoemkie tekhnologii*, 2022: 676 p. (in Russ.).
2. Porfiriev B. N., Terentyev N. E., Zinchenko Yu. V. Planning adaptation to climate change: world experience and opportunities for sustainable social and economic development of Russia. *Problemy prognozirovaniya = Studies on Russian Economic Development*. 2023; 2(197): (154—168). DOI: 10.47711/0868-6351-197-154-168 (in Russ.).
3. Kritsuk S. G., Gorny V. I., Latypov I. Sh. et al. Satellite mapping of the risk of overheating of the urban environment surface (on the example of St. Petersburg). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2019; (5): (34—44) (in Russ.).
4. Report on climate risks in the territory of the Russian Federation. *Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voejkova. Sankt-Peterburg*. 2017: 106 p. (in Russ.).
5. Geological atlas of St. Petersburg. Edited by N. B. Filippov. *Sankt-Peterburg. Kamil'fo*, 2009: 57 p. (in Russ.).
6. Filippov N. B., Serebritskiy I. A. The general scheme of coastal protection of the Resort area. *Okrumzhayushchaya sreda Sankt-Peterburga = Environment of Saint-Petersburg*. 2016; (1): Sentyabr' 2016. (22—29). (in Russ.).
7. Divinsky B. V., Kosyan R. D., Ryabchuk D. V., Sergeev A. Y. Development of the sandy coast: hydrodynamic and morphodynamic conditions (on the example of the Eastern gulf of Finland). *Oceanologia = Oceanology*. 2021; (2): 214—226. DOI: 10.1016/j.oceano.2020.12.002.
8. Ryabchuk D. V., Sergeev A. Yu., Kovaleva O. A. et al. Problems of coastal erosion in the Eastern gulf of Finland: state, prognosis of development, recommendations on coast protection. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2016; (44): (187—203). (in Russ.).

9. Geological and Environmental Risks in St. Petersburg. Practical Recommendations for Climate Change Adaptation (CliPLivE). *Sankt-Peterburg*. 2014: 82 p.
10. Pavlovskii A. A., Shamshurin V.I. The impact of the rise in the Baltic Sea level on the historical and cultural heritage of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (6): (681—693) (in Russ.).
11. Pavlovskii A. A. On development and implementation of priority measures for adaptation St. Petersburg to climate changes. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (58): (111—126) (in Russ.).
12. Pavlovskii A. A. About adaptation of St. Petersburg to climate changes. *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya = Astrakhan herald of environmental education*. 2020; (55): (139—151) (in Russ.).
13. Pavlovskii A. A. About definition of flooding zones on the territory of St. Petersburg. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2016; (43): (39—50) (in Russ.).

### ***Сведения об авторе***

*Артем Александрович Павловский*, доктор географических наук, Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга», начальник отдела, pa1@yandex.ru.

### ***Information about author***

*Artem Alexandrovich Pavlovskii*, doctor of Geographic Science, State Research and Design Center of Saint-Petersburg's Master Plan, Head of department.

*Статья поступила 17.01.2024  
Принята в печать 13.02.2024*

*The article was received on 17.01.2024  
The article was accepted 13.02.2024*

Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 44—56.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):44—56.

Научная статья  
УДК 551.571:528.8.042.8  
doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-44-56

## **Детектирование и выделение атмосферных рек по данным наблюдений спутникового радиотепловидения**

***Александр Борисович Селунский<sup>1</sup>, Владислав Викторович Вакуленко<sup>1</sup>,  
Дмитрий Михайлович Ермаков<sup>1, 2</sup>, Алексей Владимирович Кузьмин<sup>1</sup>,  
Евгений Владимирович Пашинов<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, alexendersel@mail.ru

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., Россия, pldime@gmail.com

*Аннотация.* В работе представлен начальный этап построения нового алгоритма детектирования и локализации атмосферных рек (АР) на основе анализа полей интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) по данным микроволновых сканеров SSMIS. Критерием детектирования потенциальных АР являлось превышение ИВА адаптивного порогового значения. С помощью этого критерия были построены бинарные маски областей высоких значений ИВА и проведена их скелетизация. Проанализировано положение скелетов потенциальных АР ежемесячно за первую половину 2012 г. Продемонстрирована сильная изменчивость пространственного положения потенциальных АР, определенных по представленному алгоритму. Вместе с тем четко выделены наиболее известные и стабильно формирующиеся АР. Расчет переноса влаги в АР возможен с помощью подхода спутникового радиотепловидения.

*Ключевые слова:* глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы, атмосферные реки, поля адвекции, микроволновая радиометрия, спутниковое радиотепловидение.

*Благодарности:* Работа выполнена в рамках государственных заданий ИКИ РАН (тема «Мониторинг», гос. рег. № 122042500031-8) в части адаптации и применения алгоритмов спутникового радиотепловидения, а также ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (тема «Космос-2» гос. рег. № 0030-2019-0008) в части построения общей схемы нового алгоритма детектирования и локализации атмосферных рек.

*Для цитирования:* Селунский А. Б., Вакуленко В. В., Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В. Детектирование и выделение атмосферных рек по данным наблюдений спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 44—56. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-44-56.

Original article

## Detection and selection of atmospheric rivers according to observations of satellite radiothermvision

Alexander B. Selunsky<sup>1</sup>, Vladislav V. Vakulenko<sup>1</sup>,  
Dmitry M. Ermakov<sup>1, 2</sup>, Alexey V. Kuzmin<sup>1</sup>, Evgeny V. Pashinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, alexendersel@mail.ru

<sup>2</sup> Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch Fryazino, Moscow region, Russia, pldime@gmail.com

*Summary.* The paper presents the initial stage of constructing a new algorithm for detecting and localizing atmospheric rivers (AR), which is based on the analysis of fields of the precipitable water vapor (PWV) obtained from data from SSMIS microwave scanners using the satellite radiothermvision method. An adaptable threshold for the PWV value was applied to such fields, the excess of which served as a criterion for detecting potential ARs. Using a given threshold value, binary masks of areas of high moisture content were then constructed and their skeletonization was carried out. The position of the skeletons of potential ARs was analyzed monthly for the first half of 2012. The paper demonstrated the strong variability in the spatial position of potential ARs determined by the presented algorithm. At the same time, the position and direction of the most well-known and stably forming ARs are clearly visible in the images. The method of satellite radiothermvision allows, along with the construction of global fields of the precipitable water vapor of the atmosphere, to estimate the rate of horizontal transfer of water vapor using a special method for estimating optical flow. This makes it possible to measure moisture flow through a selected cross section of potential ARs along with an analysis of their geometric parameters, morphology and time evolution, which is a further stage of research.

*Keywords:* global precipitable water vapor fields, atmospheric rivers, advection fields, microwave radiometry, satellite radiothermvision.

*Acknowledgments:* The work was carried out within the framework of the state assignments of the IKI RAS (“Monitoring”, state. reg. No. 122042500031-8) in part of adaptation and application of satellite radiothermvision algorithms, as well as IRE RAS (“Kosmos-2” state. reg. No. 0030-2019-0008) in part of constructing a general scheme of a new algorithm for detecting and localizing atmospheric rivers.

*For citation:* Selunsky A. B., Vakulenko V. V., Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Pashinov E. V. Detection and selection of atmospheric rivers according to observations of satellite radiothermvision. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):44–56. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-44-56.

### Введение

Систематическое исследование атмосферных рек (АР) началось всего несколько десятилетий назад [1—2] и вызывает оживлённую дискуссию. АР играют существенную роль в глобальном круговороте воды на Земле: согласно некоторым оценкам, на них приходится более 90 % глобального меридионального переноса водяного пара, при этом АР покрывают менее 10 % любой заданной внетропической линии широты [3]. За последние десятилетия количество исследований, посвящённых АР, растёт по всему миру.

АР выступают одной из основных причин экстремальных осадков [4—5], которые вызывают сильные наводнения во многих среднеширотных, прибрежных регионах мира, включая западное побережье Северной Америки, Западную

Европу, западное побережье Северной Африки и т.д. С другой стороны, отсутствие АР там, где они обычно бывают, зачастую приводит к возникновению засух в различных частях мира, например, Южной Африке, Испании и Португалии.

Подходы к решению проблемы систематического исследования АР развиваются в нескольких основных направлениях. Первое направление основано на использовании величины интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА). По спутниковым данным строятся поля ИВА, к которым применяется заранее определенный пороговый критерий. Области с ИВА  $> 20$  мм, более 2000 км в длину и менее 1000 км в ширину, согласно методике [6], определяются как атмосферные реки. В качестве исходных для критериальной оценки АР можно использовать данные реанализа и/или модельные оценки [7].

Второе направление связано с вычислением потока IVT (англ. Integral vapor transport) с помощью реанализа или модели атмосферного давления на горизонтах от 1000 до 300 гПа. Далее используется пороговое значение IVT для определения местоположения и границ атмосферных рек. Так, порог IVT 250 кг/(м·с) определяет АР как непрерывный объект длиной более 2000 км [8]. Величина этого порога может варьироваться для разных типов регионов: например, для АР Сибири в работе [9] было установлено пороговое значение в 200 кг/(м·с). В исследовании [5] рассматриваются процессы осадкообразования в АР на северо-восточной части Тихого океана (20—50°с.ш., 160—110° з.д.) в течение четырёх зимних сезонов (октябрь—апрель) с момента запуска спутника GPM в 2014—2018 гг. АР определяется на основе критериев, установленных в работе [10], которые были рассчитаны на основе данных Национального центра экологического прогнозирования (англ. National Centers for Environmental Prediction — NCEP) с помощью Системы прогноза климата и операционного анализа (англ. Climate Forecast System Reanalysis — CFSR) [11, 12]. Данные NCEP-CFSR доступны на горизонтальной сетке с шагом 0,5×0,5 каждые 6 ч при 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC для периода реанализа (1979—2011 гг.) и для текущего операционного периода (с 2011 г. до настоящего времени).

Более гибкий третий подход был реализован в работе [13]. Пороговое значение здесь рассчитывается для каждой точки, определенной авторами координатной сетки. Вычисляется среднесуточное значение IVT (взятое из четырех 6-часовых временных шагов) по данным за 1979—2014 гг. Из значений IVT берется максимальное, превышающее этот порог, за каждый день, а затем выполняется 15-дневное сглаживание. Это создает временную серию ежедневного максимального IVT за указанный период. Порог на каждый день года рассчитывается как 85 % сглаженных максимальных значений. Использование дневных порогов учитывает сезонные вариации, которые присутствуют в величине IVT в течение года.

Четвертый подход связан с выявлением гидрологических экстремумов, например, экстремальных осадков, наводнений [5—7, 14] или оползней [4]. После выделения экстремумов производится оценка состояния атмосферы с использованием, например, параметров ИВА или IVT, или удельной влажности в сочетании с данными о скорости и направлении ветра, чтобы установить возможное наличие атмосферной реки в исследуемой области [7]. Так, в работе [14] проводится анализ



возможных будущих стихийных катаклизмов в регионе Сан-Франциско в условиях глобального климатического потепления, в частности, исследуется одновременное возникновение атмосферных рек и внутритропических циклонов. Построена многофакторная модель средних слоёв тропосферы. Авторами утверждается, что при наличии циклонов количество осадков, переносимое АР, будет увеличиваться до 1,5 раз быстрее при повышении глобальной температуры на 1 °С по сравнению с моделью Клаузиуса–Клайперона. При этом авторы отмечают, что рост осадков в АР без циклонов будет значительно слабее. В исследовании [15] разработан алгоритм, который применяют к данным реанализа за 1997—2014 гг., чтобы исследовать влияние АР на экстремальные ветры и осадки. Авторами утверждается, что с выходом АР на сушу связано примерно от 40 до 70 % шквалов и ливней вдоль береговых линий с резким усилением скорости ветра примерно в два раза.

С самых ранних работ, посвященных атмосферным рекам [1, 2] проводится связь между ними и общей «нитевидной структурой» (“filamentary structure”) атмосферной циркуляции водяного пара. Однако нам неизвестны работы, посвященные систематическому анализу этой связи. В частности, открытым остается вопрос, является ли любой элемент «нитевидной структуры» с «подходящими» морфологическими параметрами и размерами атмосферной рекой, т. е. соответствует ли он известным феноменологическим определениям АР по критериям экстремальных значений влагосодержания и потока влаги.

Цель наших долговременных исследований — по возможности исчерпывающий анализ «нитевидной» структуры атмосферной циркуляции скрытого тепла (водяного пара), который позволил бы максимально надёжно детектировать атмосферные реки в полях геофизических параметров, прежде всего интегрального влагосодержания, нижней тропосферы и вычислять связанные с ними характеристики энерго- и массообмена. Такой подход позволил бы ответить на один из центральных проблемных вопросов: все ли «нитевидные» образования в поле интегрального влагосодержания, характеризующиеся определёнными соотношениями размеров и географическим расположением, являются «реками», т. е. обеспечивают потоки скрытого тепла, существенно превосходящие «фоновые» значения потоков вне этих рек. Предлагаемая статья описывает первые результаты в указанном направлении. Для краткости и простоты изложения далее говорится не об элементах нитевидной структуры, которые могут рассматриваться в качестве потенциальных АР, а об АР, но с учетом этой оговорки. Кроме того, продемонстрированы возможности дальнейшего изучения характеристик выделенных АР (скорости переноса водяного пара, морфологии и временной эволюции), необходимого для проверки соответствия известным феноменологическим определениям АР. Переход к систематическому изучению этих характеристик будет осуществлен на дальнейших этапах исследования. Он возможен только после массовой обработки всех имеющихся спутниковых данных по алгоритмам, построенным и описанным на текущем этапе.

Развиваемый в отделе исследований Земли из космоса Института космических исследований РАН метод спутникового радиотепловидения позволяет использовать данные микроволновых спутников SSMIS (англ. Special Sensor Microwave Imager Sounder) для построения полей интегрального влагосодержания



с глобальным покрытием как над океаном, так и над сушей, а также векторных полей адвекции водяного пара, описывающих атмосферную динамику. На основе этих данных проводится выделение АР по суточным изображениям водяного пара по всей планете. Алгоритм программного выделения АР на картах спутниковых данных основан на применении адаптируемого порогового значения интегрального влагосодержания, превышение которого служит критерием детектирования АР.

### Алгоритм выделения атмосферных рек

В нашей работе алгоритм выделения АР построен на анализе изображений интегрального влагосодержания атмосферы, полученных по данным микроволновых сканеров SSMIS [16] с использованием метода спутникового радиотепловидения. Одной из проблем непосредственного использования данных SSMIS для анализа интегрального водяного пара является наличие лагун в спутниковых данных. Схема сканирования SSMIS не позволяет получать полного покрытия данными всего Земного шара, из-за чего между областями измерений остаются существенные лагуны. Суть методики спутникового радиотепловидения состоит в возможности восстановления интегральных по высоте атмосферы адвективных потоков водяного пара по данным спутникового радиотеплового мониторинга [17] и заключается в вычислении такого поля скорости адвекции, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального влагосодержания, выстроенных в хронологическом порядке при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости). Наложение полей ИВА на регулярную сетку координат  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  выполнялось при помощи линейной интерполяции ближайших к центру узла сетки измерений. Далее проводилось устранение пропусков данных в полях ИВА. Для SSMIS оказывается возможным устранить лагуны практически полностью, закрывая пропуски в данных с одного спутника данными с другого. Временной промежуток между измерениями разными спутниками DMSP одной и той же точки поверхности медленно варьируется с течением времени и составляет порядка 1—2 часов. За основные поля были приняты данные ИВА со спутника F16, затем пропуски в них были закрыты данными F18 и F17. Оставшиеся незначительные лагуны устраняются линейной интерполяцией данных на их краях.

Применение метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные изображения ИВА, убрав лагуны с пропусками данных [17]. К такому изображению применялся адаптируемый порог значения интегрального влагосодержания, превышение которого служит критерием детектирования АР. Суть применения адаптируемого порога [18] заключается в том, что по изображению проходит окно настраиваемого размера, в котором вычисляется среднее значение. Порог  $t$  (например, 0,3) задается долей от среднего значения. Если значение пикселя меньше, чем  $t$ , умноженное на среднее в окне, то ему присваивается 0, если больше, то — 1.

По заданному пороговому значению далее строится бинарная маска областей высокого влагосодержания и проводится их скелетизация — построение «скелетов» выделенных областей. После этого происходит оценка возможной фрагментации скелетов и соединение фрагментов, относящихся к одной АР.

Скелетом в компьютерной графике называется множество точек, равноудалённых от границ фигуры. Скелет подчёркивает геометрические и топологические свойства фигуры, такие как её соединения, связность, длина, направление, ширина [19]. Фактически скелет становится представлением формы фигуры, упрощает её дальнейший анализ. Скелетизация даёт возможность представить бинарное изображение (маску) в виде множества тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых адекватно описывают размеры, форму и ориентацию в пространстве соответствующих областей изображения АР. Главные задачи скелетизации при детектировании АР: уточнение положения оси АР (линии, вдоль которой ожидаются максимальные потоки водяного пара); объединение фрагментов образа АР в единую фигуру; подготовка к трассировке АР во времени (отождествлению АР на последовательных изображениях за разные сутки и описанию её эволюции).

Одна из проблем в алгоритме выделения АР заключается в подборе порогового значения. Для отработки всей методики исследования АР как единого конвейерного процесса возникла необходимость быстрой реализации ряда ключевых процедур обработки. В связи с этим некоторые из них, предполагающие в дальнейшем значительную автоматизацию на основе накопленной статистики обработки, на первом этапе заменены их упрощёнными аналогами. Так, подбор оптимального порога интегрального влагосодержания на данный момент осуществляется методом визуального перебора. На рис. 1 *а* в верхней панели представлено изображение ИВА 30 августа 2020 г. На нём схематично отмечены наиболее часто формирующиеся в Северном полушарии атмосферные реки: «Ананасовый экспресс» над Тихим океаном [20] (стрелка «А») и «Майянский экспресс» над Северной Атлантикой [21] (стрелка «М»). Фактические конфигурации обеих АР сильно варьируются в зависимости от крупномасштабных параметров метеорологических полей над соответствующими акваториями. В левой колонке (рис. 1 *б*) показано обработанное изображение с адаптивным порогом 0,3. Это безразмерная величина — число в диапазоне 0—1. Оно показывает, какая часть пикселей, удовлетворяющих значению выбранного оптимального порога интегрального влагосодержания, будет представлена визуально на переднем плане. Рисунок 1 *г* в левой колонке демонстрирует скелетизацию, сделанную по бинарной маске с порогом 0,3.

На рис. 1 в правой колонке представлены бинарная маска (*в*); скелетизация изображения с адаптивным порогом 0,5 (*д*). Высокое значение чувствительности приводит к выделению большого количества пикселей в качестве переднего плана с риском включения некоторых фоновых пикселей. В дальнейших исследованиях предполагается процесс подбора порогового значения сделать автоматическим.

### Применение алгоритма

При проверке алгоритма определения АР возникает закономерный вопрос: насколько устойчива АР, определённая по суточному изображению водяного пара, в пространстве. Наземные реки меняют свои русла, но это происходит довольно медленно, многие десятилетия. Атмосферные реки, в противоположность наземным, очень изменчивы в силу того, что их положение определяется градиентным полем атмосферного давления. Для проверки устойчивости положения АР

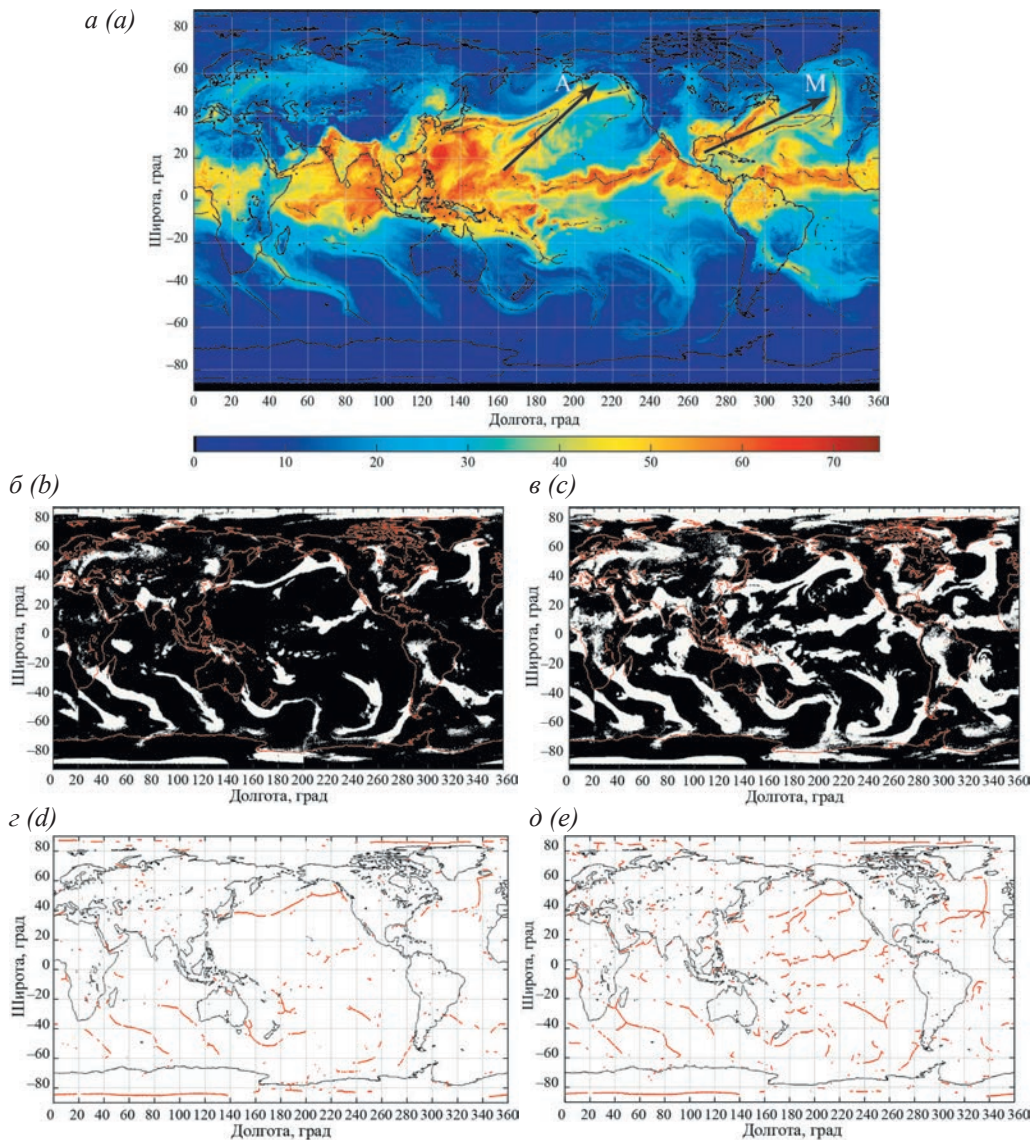


Рис. 1. Изображения ИВА 30.08.2020 (а); в левой колонке представлены обработанные изображения с адаптивным порогом 0,3: б — бинарная маска; г — скелетизация; в правой колонке представлены обработанные изображения с адаптивным порогом 0,5: в — бинарная маска; д — скелетизация; цветовая шкала дана в кг·м<sup>-2</sup>.

Fig. 1. Images of the precipitable water vapor on 08/30/2020 (a); the left column shows processed images with an adaptive threshold of 0.3: b — binary mask; d — skeletonization; the right column shows processed images with an adaptive threshold of 0.5: c — binary mask; d — skeletonization; color scale is given in kg m<sup>-2</sup>.



на рис. 2 собраны изображения скелетов АР, накопленные ежемесячно за первую половину 2012 г. Такое представление АР позволяет выделить районы движения АР и проследить их месячные вариации. Изображения скелетов на рис. 2 получены простым арифметическим сложением, что показывает мощность и устойчивость данной АР.

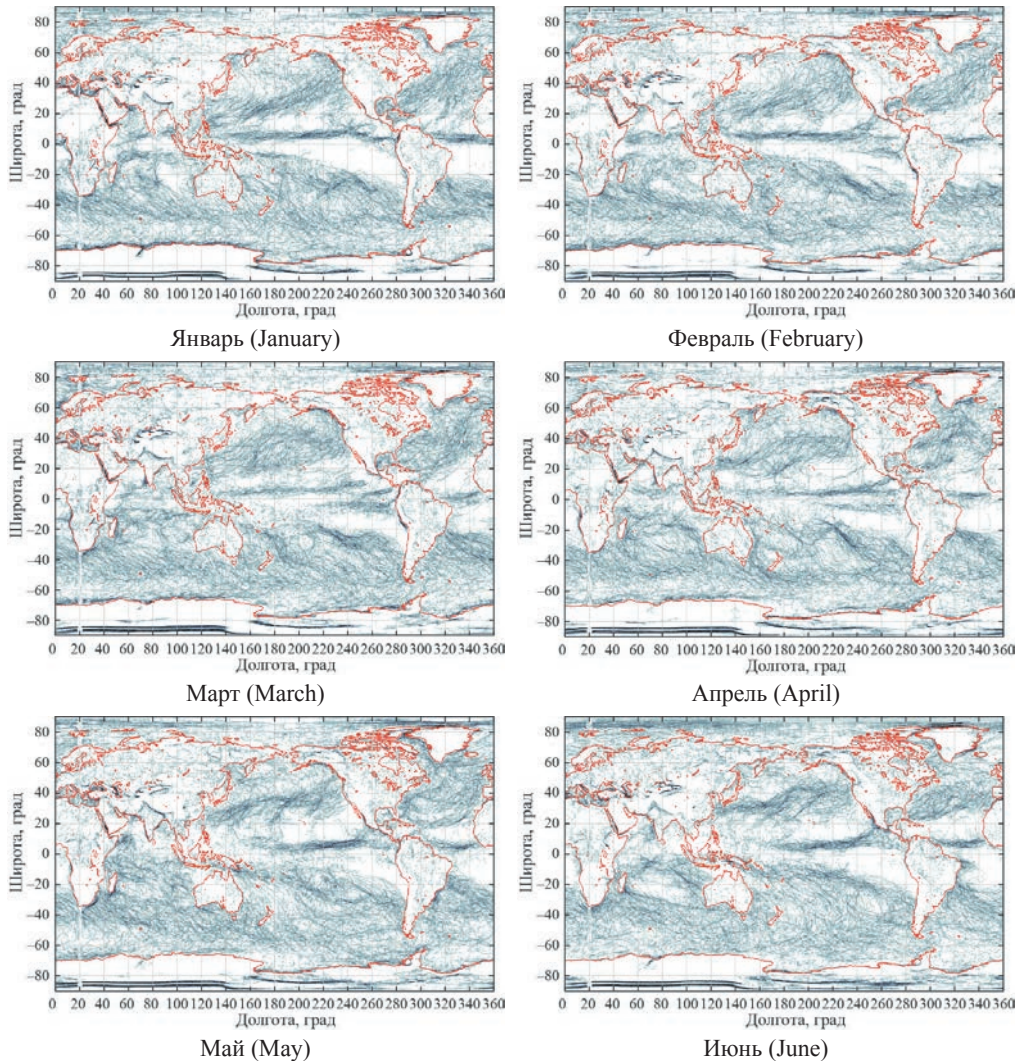


Рис. 2. Изображения скелетов АР, накопленные ежемесячно за первую половину 2012 г., которые показаны серыми линиями. Красным цветом обозначены материки.

Fig. 2. Images of AR skeletons accumulated monthly for the first half of 2012 are shown with gray lines, continents are indicated in red.

На рис. 3 представлены изображения скелетов АР за тот же период 2012 г., однако помесечное сложение проводилось «логическим» образом, так что показаны все скелеты, которые хоть раз появлялись в этом месяце. Такое представление

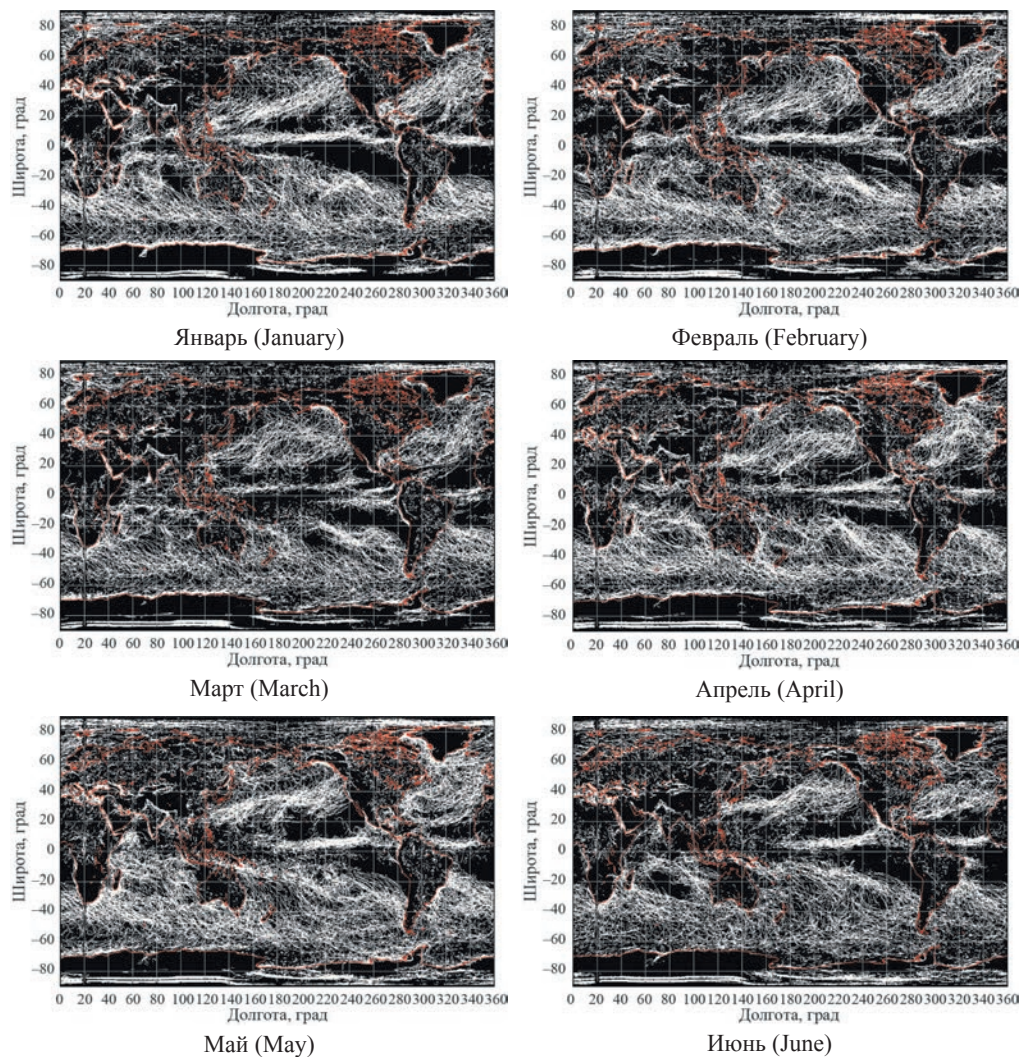


Рис. 3. Изображения скелетов АР, накопленные помесечно за первую половину 2012 г. Скелеты АР показаны белыми линиями, красным цветом обозначены материки. Накопление проводилось по бинарным изображениям скелетов АР с помощью логической операции «или».

Fig. 3. Images of AR skeletons accumulated monthly for the first half of 2012. AR skeletons are shown with white lines, continents are indicated in red. Accumulation was carried out using binary images of AR skeletons using the logical operation «or».



АР показывает как их изменчивость, так и тот обширный район, где данная АР проявляется.

Метод спутникового радиотепловидения позволяет наряду с построением глобальных полей водяного пара оценить их горизонтальную адвекцию по специальной методике оценки оптического потока [16], что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение АР. На рис. 4 приведено суточное изображение интегрального влагосодержания, в котором оценён расход влаги через сечение, отмеченное чёрным прямоугольником с координатами  $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$  ю.ш. и  $142^{\circ}$  з.д. Расход влаги через этот рукав АР составил  $27,1 \cdot 10^6$  кг/с на 2 июля 2019 г. 06 часов утра местного времени. Протяжённость АР составила  $12^{\circ}$  широты, что составляет примерно 1300 км. Чёрными векторами показано направление горизонтальной адвекции, определённое методом спутникового радиотепловидения.

Дальнейшие планы исследований в данном направлении связаны, с одной стороны, с систематическим анализом соответствия выделенных «потенциальных» АР их феноменологическим определениям (по скорости переноса водяного пара, геометрическим размерам и т.д.), построением глобальной и региональной климатологии АР на основе автоматизации процесса детектирования АР; с другой

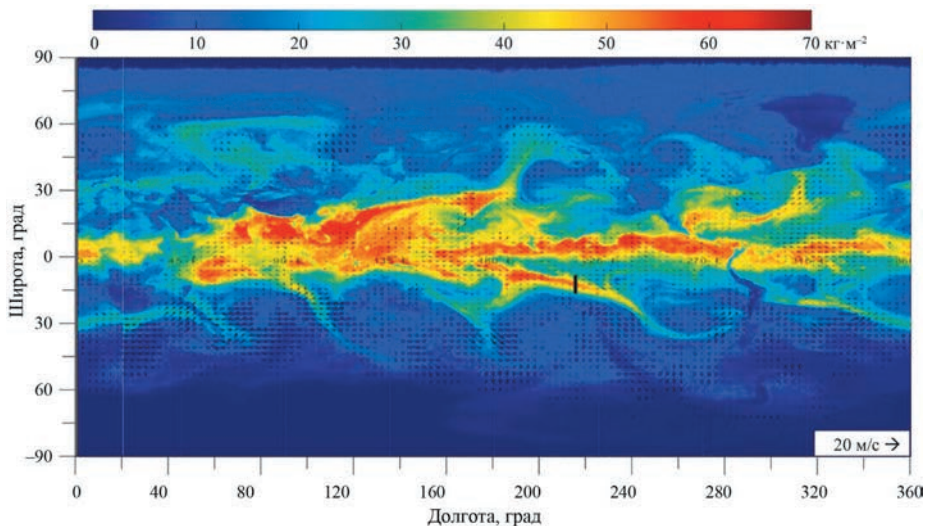


Рис. 4. Суточное изображение ИВА на 2 июля 2019 г. 06:00:00 am. Чёрными векторами показаны направления горизонтальной адвекции, определённые методом спутникового радиотепловидения. Расход влаги через сечение, отмеченное чёрным прямоугольником с координатами  $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$  ю.ш. и  $142^{\circ}$  з.д., в АР составляет  $27,1 \cdot 10^6$  кг/с.

Fig. 4. Daily image of precipitable water vapor for July 2, 2019 06:00:00 am. Black vectors show the directions of horizontal advection determined by satellite radiothermvision method. Moisture flow through the section marked with a black rectangle with coordinates  $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$  S, and  $142^{\circ}$  W, in the AR equals  $27.1 \cdot 10^6$  kg/s.

стороны, с выявлением и количественным описанием параметров связи внутри-годовых и межгодовых региональных особенностей формирования АР с развитием чрезвычайных ситуаций, экстремальных погодных явлений и стихийных бедствий и катастроф (наводнений, засух, усиления пожароопасности и др.).

### Заключение

По полученным длинным рядам глобальных полей ИВА (2012—2022 гг.) и его адвекции на основе данных микроволновых спутниковых радиометров с использованием метода спутникового радиотепловидения предложена и реализована методика первого этапа детектирования атмосферных рек как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей. Представленный алгоритм выделения АР построен на анализе полей ИВА, полученных по данным микроволновых сканеров SSMIS. Использование метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные поля ИВА, убрав лакуны с пропусками данных. К таким полям применялся адаптируемый порог значения интегрального влагосодержания, превышение которого служило критерием детектирования потенциальной АР. Далее по заданному пороговому значению были построены бинарные маски областей высокого влагосодержания и проведена их скелетизация.

Проанализировано положение скелетов АР ежемесячно за первую половину 2012 г. Была продемонстрирована сильная изменчивость пространственного положения АР. Вместе с тем, положение и направление наиболее известных и стабильно формирующихся АР чётко выделяется на изображениях. Метод спутникового радиотепловидения позволяет, наряду с построением глобальных полей ИВА, оценить вертикально интегрированный горизонтальный поток водяного пара по специальной методике оценки оптического потока, что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение АР. Дальнейшие усилия авторов будут направлены на разработку автоматизированного алгоритма адаптируемого порога значений интегрального влагосодержания для разных сезонов, акваторий Мирового океана и суши, оценки расхода влаги в АР, а также анализа морфологии и временной эволюции АР. Этот шаг позволит перейти к построению региональной климатологии АР и выявлению их вклада в формирование экстремальных погодных условий и стихийных бедствий.

### References

1. Newell R. E., Newell N. E., Zhu Y., Scott C. Tropospheric rivers? — A pilot study. *Geophysical Research Letters*. 1992; 19(24):2401—2404. <https://doi.org/10.1029/92GL02916>.
2. Zhu Y., Newell R. E. Atmospheric rivers and bombs. *Geophysical Research Letters*. 1994; 21(18):1999—2002. <https://doi.org/10.1029/94GL01710>.
3. Zhu Y., Newell R. E. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 1998; 126(3):725—735. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0725:APAF-MF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAF-MF>2.0.CO;2).
4. Cordeira J. M., Stock J., Dettinger M. D. et al. A 142-year climatology of northern California landslides and atmospheric rivers. *Bull. American Meteorological Society*. 2019; 100(8):1499—1509. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0158.1>.



5. Cannon F., Cordeira J. M. Hecht C. W. et al. GPM satellite radar observations of precipitation mechanisms in atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 2020; 148(4):1449—1463. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0278.1>.
6. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. Satellite and CALJET Aircraft Observations of Atmospheric Rivers over the Eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98. *Monthly Weather Review*. 2004; (132):1721—1745. doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<1721:SACAOO>2.0.CO;2.
7. Ralph F. M., Dettinger M. D. Storms, floods, and the science of Atmospheric rivers EOS. *Trans. American Geophysical Union*. 2011; 92(32):265—266. <https://doi.org/10.1029/2011EO320001>.
8. Rutz J. J., Steenburgh W. J., Ralph F. M. Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the western United States. *Monthly Weather Review*. 2014; (142):905—921. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00168.1>.
9. Komatsu K. K., Alexeev V. A., Repina I. A. et al. Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air. *Scientific Reports*. 2018; (8):2872. doi: 10.1038/s41598-018-21159-6.
10. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. American Meteorological Society*. 2010; (91):1015—1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
11. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP Climate Forecast System version 2. *J. Climate*. 2014; (27):2185—2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>.
12. Gonzales K.R., Swain D.L., Barnes E.A., Diffenbaugh N.S. Moisture-versus wind-dominated flavors of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*. 2020; 47(23):(e2020GL090042). <https://doi.org/10.1029/2020GL090042>.
13. Nayak M. A., Villarini G. Remote sensing-based characterization of rainfall during atmospheric rivers over the central. *United States J. Hydrology*. 2018; (556):1038—1049.
14. Waliser D., Guan B. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nature Geoscience*. 2017; 10(3):179—183. <https://doi.org/10.1038/ngeo2894>.
15. Patricola C. M., Wehner M. F., Bercos-Hickey E. et al. Future changes in extreme precipitation over the San Francisco Bay Area: Dependence on atmospheric river and extratropical cyclone events. *Weather and Climate Extremes*. 2022; (36):(100440). <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100440>.
16. Kunkel D. B., Poe G. A., Boucher D. J. et al. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008; (46):863—883. doi: 10.1109/tgrs.2008.917980.
17. Ermakov D. *Satellite radiothermovision of atmospheric processes: method and applications*. Cham: Springer. 2021: 199 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
18. Bradley D., Roth G. Adapting Thresholding Using the Integral Image, *J. Graphics Tools*. 2007; 12(2):13—21.
19. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. Cham: Pearson. 3<sup>rd</sup> ed. 2007: 976 p.
20. Lackman G. M., Gyakum J. R. Heavy cold-season precipitation in the northwestern United States: Synoptic climatology and an analysis of the flood of 17–18 January 1986. *Weather and Forecasting*. 1999; 14(5):687—700. doi: 10.1175/1520-0434(1999)014,0687:HCSPIT.2.0.CO.
21. Dirmeyer P.A., Kinter III J. L. The «Maya Express»: Floods in the U.S. Midwest EOS, // *Trans. American Geophysical Union*. 2011; 90(12):101–102. doi: 10.1029/2009EO120001.

### Сведения об авторах

Александр Борисович Селунский, ведущий математик, Институт космических исследований РАН, alexendersel@mail.ru.

Владислав Викторович Вакуленко, магистрант, Институт космических исследований РАН, vlad.vv710@gmail.com.

Дмитрий Михайлович Ермаков, доктор. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт космических исследований РАН; ведущий научный сотрудник, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, dima@ire.rssi.ru.

Алексей Владимирович Кузьмин, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, kuzmin@cosmos.ru.

Евгений Владимирович Пашинов, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, pashinove@mail.ru.

***Information about authors***

*Alexander Borisovich Selunsky*, leading mathematician, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

*Vladislav Viktorovich Vakulenko*, master's student, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

*Dmitry Mikhaylovich Ermakov*, Dr.Sc. (Phys.-mat. Sci.), head of department, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences; leading scientist, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences.

*Alexey Vladimirovich Kuzmin*, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), leading scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, kuzmin@cosmos.ru.

*Evgeny Vladimirovich Pashinov*, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, pashinove@mail.ru.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 26.10.2023*

*Принята к печати после доработки 15.01.2024*

*The article was received on 26.10.2023*

*The article was accepted after revision on 15.01.2024*

Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 57—72.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):57—72.

Научная статья

УДК 551.524«321»«323»

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72

## **Формирование аномального термического режима осенью и весной на Европейской территории России**

***Татьяна Романовна Шишкина<sup>1</sup>, Юлия Викторовна Ефимова<sup>1</sup>,  
Ирина Викторовна Лаврова<sup>1, 2</sup>, Ирина Александровна Иванова<sup>1</sup>,  
Екатерина Петровна Иванова<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, t.shishkina@rshu.ru

<sup>2</sup> Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт, Санкт-Петербург.

*Аннотация.* В статье проанализированы среднесуточные и среднемесячные значения температуры воздуха осенью и весной в северо-западной и центральной частях Европейской территории России за 1959—2018 гг. Выделены границы градаций, при которых среднесуточная температура воздуха считалась аномальной, и проанализировано число случаев аномально теплых и холодных дней за два периода с 1959 г. по 1988 г. и с 1989 г. по 2018 г. Оценена статистическая значимость изменений среднемесячных значений температуры воздуха и числа случаев аномально теплых и холодных дней за два периода. Определены характерные синоптические ситуации для дней с аномально высокими и низкими значениями среднесуточной температуры воздуха.

*Ключевые слова:* аномальные значения температуры воздуха, Европейская территория России, синоптическая ситуация, планетарная высотная фронтальная зона.

*Для цитирования:* Шишкина Т. Р., Ефимова Ю. В., Лаврова И. В., Иванова И. А., Иванова Е. П. Формирование аномального термического режима осенью и весной на Европейской территории России // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 57—72. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72.

Original article

## **Formation of an anomalous thermal regime in autumn and spring on the European territory of Russia**

***Tatyana R. Shishkina<sup>1</sup>, Yulia V. Efimova<sup>1</sup>, Irina V. Lavrova<sup>1, 2</sup>,  
Irina A. Ivanova<sup>1</sup>, Ekaterina P. Ivanova<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, t.shishkina@rshu.ru

<sup>2</sup> The State Research Navigation-Hydrographic Institute, Saint Petersburg.

*Summary.* The article analyzes the average daily and average monthly air temperatures in autumn and spring in the northwestern and central parts of the European territory of Russia from 1959–2018.

The bifurcation points for the average annual air temperature were determined separately for the northern, central and southern parts of the European territory of Russia. The boundaries of the gradations at which the average daily air temperature was considered abnormal were identified, and the number of cases of abnormally warm and cold days for two periods (1959—1988 and 1989—2018) was analyzed. Maps of the spatial distribution of changes in the number of abnormally warm and abnormally cold days were constructed in the GIS Mapinfo program. The statistical significance of changes in average monthly air temperatures and the number of cases of abnormally warm and cold days for two periods was assessed. Typical synoptic situations for days with abnormally high and low values of average daily air temperature have been determined. An increase in average monthly air temperatures in both autumn and spring is observed everywhere. The change in trend in average annual air temperature for the entire study area occurred in the late 1980s. The number of abnormally warm and abnormally cold days for the two periods in the fall did not change significantly. In spring, the number of abnormally cold days increases, and the number of abnormally warm days decreases. An increase in abnormally cold days in spring was noted in the northwest and southeast of the study area. A cold center has been identified in the Barents Sea, influencing the formation of abnormally low average daily air temperatures. The influence of the shift in the position of the planetary altitude frontal zone on the occurrence of anomalous values of the average daily air temperature has been revealed.

*Keywords:* anomalous values of air temperature, European territory of Russia, transitional seasons of the year, synoptic situation, planetary high-altitude frontal zone.

*For citation:* Shishkina T. R., Efimova Yu. V., Lavrova I. V., Ivanova I. A., Ivanova E.P. Formation of an anomalous thermal regime in autumn and spring on the European territory of Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):57—72. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72.

## Введение

Аномальные среднесуточные температуры воздуха относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям. По своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности значительные отклонения температуры воздуха от среднего могут оказать негативное воздействие на сельское хозяйство, объекты экономики и окружающую природную среду [1—4].

По данным исследований, повышение температуры воздуха на Европейской территории России значительно превышает темпы роста температуры в Северном полушарии [5]. Наблюдаемое глобальное потепление климата способствует изменению количества случаев аномальных значений многих метеорологических характеристик, в том числе и среднесуточной температуры воздуха. Практический интерес представляет исследование аномальных значений среднесуточной температуры воздуха осенью и весной, так как в эти периоды циркуляционные процессы менее устойчивы [6, 7].

Целью исследования является анализ синоптических ситуаций, способствующих формированию аномальных значений среднесуточной температуры воздуха осенью и весной на Европейской территории России за период с 1959 г. по 2018 г.

## Объект и методы исследования

Для исследования выбраны 16 станций северо-западной и центральной частей Европейской территории России (ЕТР), расположение которых приводится на рис. 1. Отметим, что указанные станции имеют непрерывные данные наблюдений за одинаковый период с 1959 г. по 2018 г., содержащиеся в архиве ВНИИГМИ-МЦД. Нами использовались среднесуточные значения температуры воздуха.

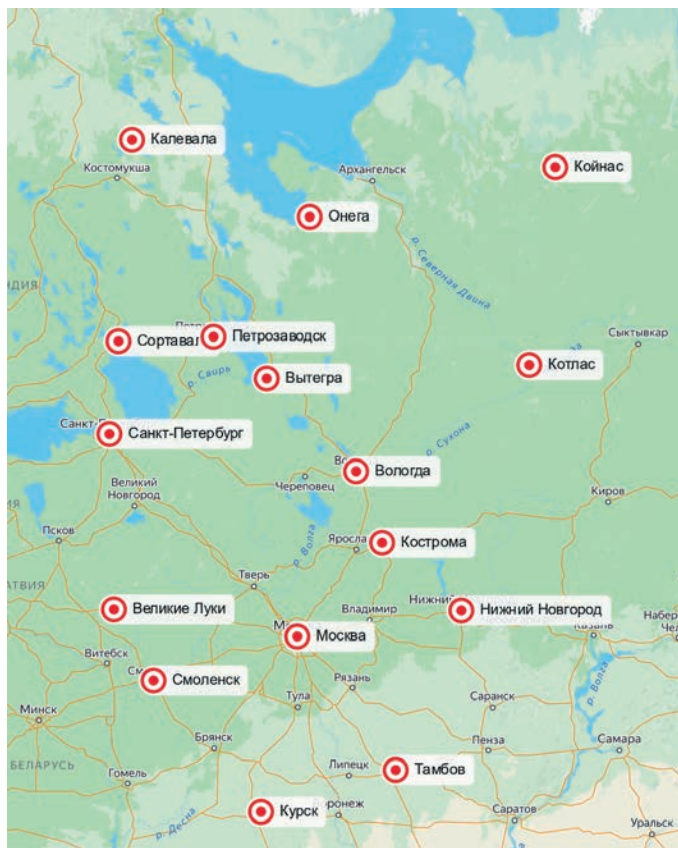


Рис. 1. Схема расположения гидрометеорологических станций на Европейской территории России, данные с которых используются в настоящей работе.

Fig. 1. Location map of hydrometeorological stations on the European territory of Russia, the data from which are used in this work.

Для выделения дней с аномально высокими и низкими значениями среднесуточной температуры воздуха на ЕТР были определены границы 5 градаций («среднее», «ниже среднего», «значительно ниже среднего», «выше среднего» и «значительно выше среднего») в выбранных пунктах.

Для анализа дней с «аномально высокой» и «аномально низкой» среднесуточной температурой воздуха использовались градации «значительно выше среднего» (ЗВС) и «значительно ниже среднего» (ЗНС). В работе использован метод квартилей, который является аналогом метода процентилей, принятого в Гидрометцентре РФ [4, 8]. Данные методы позволяют определить выбросы, которые были приняты за аномальные значения.

В работе также проанализированы среднегодовые значения температуры воздуха и определены точки бифуркации (смены тренда) в разных частях региона

исследования. Для определения точек бифуркации использован алгоритм, предложенный д.ф.-м.н. А. Д. Кузнецовым, заменяющий временной ряд математической моделью. В качестве модели использовался полином первой степени [9].

Оценена статистическая значимость изменений среднемесячной температуры воздуха за два периода (с 1959 г. по 1988 г. и с 1989 г. по 2018 г.), существенно отличающихся друг от друга климатическим режимом. Статистическая значимость оценивалась на основе сравнения стандартной ошибки среднего для всего ряда и величины изменения среднемесячной температуры воздуха за весь период исследования для всех станций. Аналогичные расчеты были проведены и для оценки статистической значимости изменения числа случаев аномально теплых и аномально холодных дней.

Стандартная ошибка среднего определялась по формуле:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение,  $n$  — период наблюдений. Изменения считались статистически значимыми, если величина изменения значений исследуемой характеристики превышала стандартную ошибку средней.

Для выявления особенностей циркуляционного режима аномально теплых и аномально холодных дней были привлечены синоптические карты из архива данных реанализа NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSRv1) за период с 1959 г. по 2018 г. [10]. В исследовании анализировались следующие поля: АТ–850 гПа, температура воздуха на уровне 2 м, а также совмещенная карта АТ–500 гПа и давления на уровне моря (MLSP).

В работе осенний и весенний сезоны рассматривались отдельно.

### Результаты исследования

На первом этапе работы рассматривалась среднемесячная температура воздуха сентября, октября и ноября с 1959 г. по 2018 г. для всех 16 станций. Чтобы зафиксировать ее изменения, ряды были разделены на периоды по 30 лет: первый — с 1959 г. по 1988 г., второй — с 1989 г. по 2018 г. На всех станциях в каждом месяце наблюдается увеличение среднемесячных значений температуры воздуха. В сентябре и октябре изменения статистически значимы для всех 16 станций, в ноябре — для 11 станций. В табл. 1 приводятся оценки изменений среднемесячной температуры воздуха осени за период с 1989 г. по 2018 г. по сравнению с периодом с 1959 г. по 1988 г., статистически значимые изменения выделены полужирным курсивом. Нетрудно увидеть, что в сентябре—октябре на всех станциях эти изменения являются значимыми.

На рис. 2 в качестве примера показан сравнительный анализ среднемесячных значений температуры воздуха ноября за два периода. Ноябрь представляет интерес, поскольку является границей между календарной осенью и зимой. На большей части территории в ноябре фиксируются даты устойчивого перехода температуры воздуха через нулевую отметку и их сдвиг на более ранние сроки [6, 11, 12].



Таблица 1

Статистическая оценка значимости изменений среднемесячной температуры воздуха осени за период с 1989 г. по 2018 г. по сравнению с периодом с 1959 г. по 1988 г. ( $\Delta t$ )\*  
 Statistical assessment of the significance of changes in the average monthly air temperature of the autumn season for the period 1989—2018 compared to 1959—1988 ( $\Delta t$ )

	Калевала	Койнас	Онега	Петро-ск	Сорта-вала	Котлас	Вытегра	СПб.	Вологда	Кострома	Ниж. Нов.	Вел. Луки	Москва	Смоленск	Тамбов	Курск
Сентябрь																
$\Delta t$	<b>1,0</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>
SE	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Октябрь																
$\Delta t$	<b>0,6</b>	<b>1,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,1</b>
SE	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ноябрь																
$\Delta t$	<b>1,0</b>	0,2	0,3	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	0,2	0,3	<b>0,7</b>	0,2	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>
SE	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

\* полужирным шрифтом выделены значимые отклонения  $\Delta t$

Необходимо отметить, что на всех станциях в ноябре наблюдается потепление, среднемесячная температура воздуха во втором периоде на станциях Великие Луки и Курск в среднем оказывается выше нуля.

В работе исследована смена тренда во временном ряду среднегодовых значений температуры воздуха. Смена тренда определялась при помощи алгоритма поиска точек бифуркации, предложенного в работе [9]. Подобная работа на основе

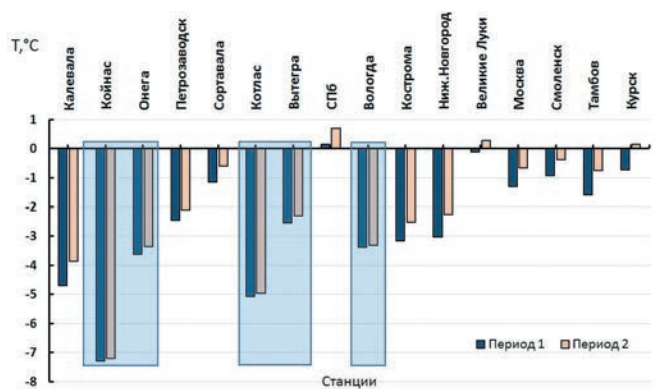


Рис. 2. Среднемесячные температуры воздуха в ноябре за первый (1959—1988 гг.) и второй периоды (1989—2018 гг.). Синими прямоугольниками обозначены незначимые отклонения температуры.

Fig. 2. Average long-term monthly air temperatures in November for the first (1959—1988) and second periods (1989—2018). Blue rectangles indicate insignificant deviations air temperatures.



данного метода была проведена для северной части России [13]. Далее рассчитываются параметры математической модели — коэффициенты линейного тренда. Оценивается «близость» параметров математической модели при помощи среднеквадратического отклонения тренда от значений временного ряда [9].

Точки бифуркации во временном ряду среднегодовой температуры воздуха за период с 1959 г. по 2018 г. определены для всей области исследования, а также для северной, центральной и южной ее частей (рис. 3).

В северную часть территории входили станции: Калевала, Койнас, Онега, Сортавала, Петрозаводск, Вытегра, Котлас. В центральную часть: Санкт-Петербург, Великие Луки, Смоленск, Вологда, Кострома, Нижний Новгород, Москва. При расчете точки бифуркации в южной части к станциям Тамбов, Курск для анализа дополнительно были введены станции Астрахань, Ростов-на-Дону, Волгоград.

Для всей ЕТР (рис. 3 а) точка бифуркации приходится на 1986—1987 гг. Для северной части ЕТР смена климатических процессов наступила в 1961—1962 гг. В центральной части — в 1986—1987 гг. В южной части — в 1974—1975 гг.

Возможно, причина таких отличий связана с изменчивостью региональных высотных фронтальных зон, которая может влиять на колебания атмосферных процессов над территорией исследования и, соответственно, на изменение термического режима [14].

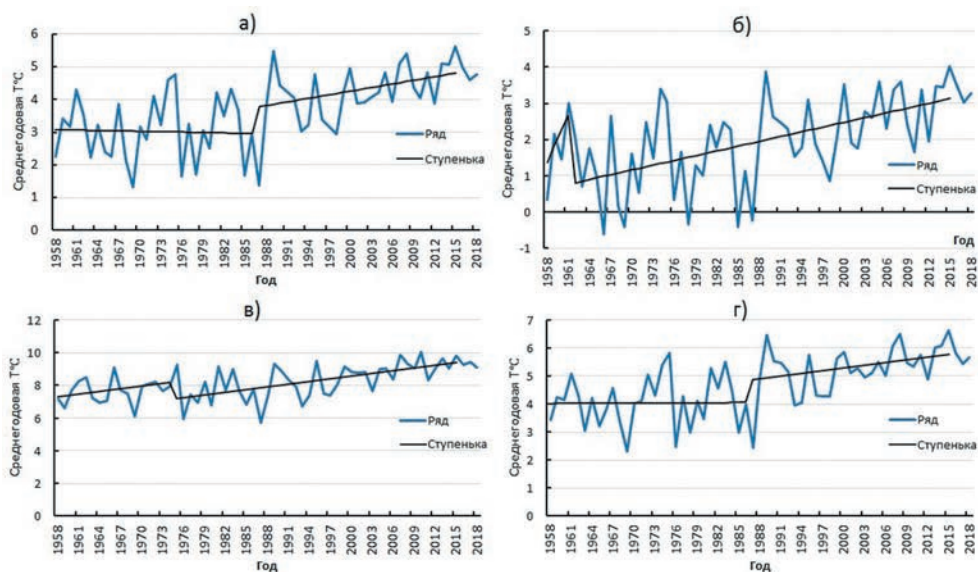


Рис. 3. Межгодовая изменчивость температуры воздуха для отдельных частей исследуемого региона с указанием положения точек бифуркации:

а) вся область исследования, б) северная часть, в) южная часть, г) центральная часть.

Fig. 3. Interannual variability of air temperature for individual parts of the research region, indicating the position of bifurcation points:

a) the entire research area, b) the northern part, c) the southern part, d) the central part.

### Анализ условий формирования аномального термического режима осени на Европейской территории России

Обратимся к табл. 2, в которой представлено число дней с аномально высокими и низкими значениями среднесуточной температуры воздуха за два периода. Можно видеть, что количество аномально теплых дней и аномально холодных дней за два периода изменилось незначительно. Однако во втором периоде, особенно начиная с 90-х годов XX века, наблюдается повышение значений температуры, относящихся к градации «ЗВС» и «ЗНС».

Таблица 2

Число аномально теплых и аномально холодных дней осеннего периода  
Frequency of anomalously warm and anomalously cold days in autumn

Период, годы	Аномально теплые дни, кол-во	Аномально холодные дни, кол-во
1959—1988 гг.	4583	5145
1989—2018 гг.	4574	5126
Изменение	-9	-19

Анализ синоптической ситуации проводился для тех случаев, когда аномальные значения среднесуточной температуры воздуха наблюдались на большей части области исследования, т. е. более, чем на 50 % станций. Было выявлено 223 случая. На рис. 4 представлена типовая синоптическая ситуация, наиболее характерная для аномально теплых дней осени.

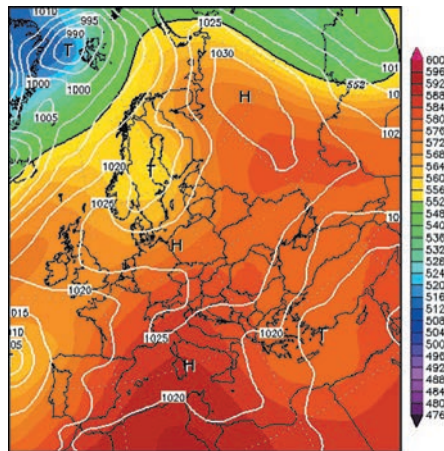


Рис. 4. Синоптическая ситуация (АТ-500+МЛСП), характерная для аномально теплых дней осени на примере 01.10.2007.

Черная изолиния — ПВФЗ. Белые изолинии — давление над уровнем моря.  
Шкала справа — высота поверхности АТ-500 в Гп.дам.

Fig. 4. Synoptic situation for abnormally warm days in autumn 10/01/2007 (AT-500+MLSP).

Black isoline — high altitude frontal zone. White isolines — pressure above sea level.  
The scale on the right is the height of the AT-500 surface in gp.dam.

На рис. 4 видно, что область исследования находится в малоградиентном поле повышенного давления. При этом отмечается нестандартное положение планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ), представленной на рисунке черной изогипсой, которая расположена более чем на 1500 км севернее ее среднесезонного положения [15]. На высоте 5 км циркулирует тропический теплый воздух, поэтому территория исследования находится под влиянием аномально теплых воздушных масс.

На рис. 5 представлена характерная синоптическая ситуация для аномально холодных дней осеннего сезона. Рассматриваемая область находится в ложбине арктического циклона, расположенного севернее Новой Земли, ПВФЗ сместилась далеко на юг. Завихрения воздушных масс наблюдаются с Баренцева моря [16], где был выявлен очаг холода, влияющий на формирование аномально холодной погоды над регионом исследования.

Наиболее интересные синоптические ситуации наблюдаются в ноябре. На некоторых станциях (Великие Луки и Курск) во втором периоде среднемесячная температура перешла через 0 °С в сторону слабоположительных значений. Циркуляционный режим этого месяца также представляет интерес, так как похожая синоптическая ситуация в одном случае может вызвать аномальное тепло, в другом — аномальный холод.

В первом случае область исследования находится под влиянием центральной и восточной периферий стационарного антициклона с центром над Псковской областью, его приземный и высотный центры совпадают (например, 10.11.2003).

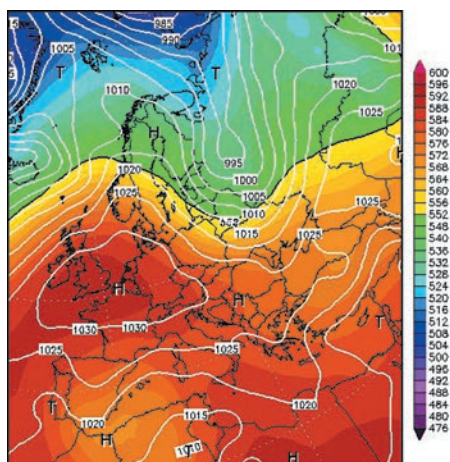


Рис. 5. Синоптическая ситуация (AT-500+ MLSP), характерная для аномально холодных дней осенью на примере 30.09.1986.

Черная изолиния — ПВФЗ. Белые изолинии — давление над уровнем моря.

Шкала справа — высота поверхности AT-500 в Гп.дам.

Fig. 5. Synoptic situation for abnormally cold days in autumn 09/30/1986 (AT-500+MLSP).

Black isoline — high altitude frontal zone. White isolines — pressure above sea level.

The scale on the right is the height of the AT-500 surface in gp.dam.

В этом случае антициклон имеет Азорское происхождение, ПВФЗ находится значительно выше своего среднесезонного положения. На карте АТ–850 вся территория находится под влиянием гребня тепла, при котором устанавливаются аномально высокие значения среднесуточной температуры воздуха.

В случае с аномальным холодом область исследования находится под влиянием центральной и северной периферий антициклона, расположенного над всей ЕТР (например, 11.11.1993). Особенность данного арктического антициклона состоит в том, что он смещался не с юго-запада, как предыдущий, а с севера. При таких траекториях в конце осени антициклон может принести морозную погоду, а потоки холодных воздушных масс с востока являются дополнительным фактором охлаждения воздуха. Аномально холодная погода наблюдалась в центральной части области исследования.

### Анализ среднемесячных значений температуры воздуха весной на Европейской территории России

Для весеннего периода также были рассчитаны и проанализированы среднемесячные значения температуры воздуха в период с 1959 г. по 2018 г. Выявлено, что для всех станций характерно увеличение среднемесячных значений температуры воздуха в целом для весеннего периода. В марте в среднем температура воздуха увеличилась на 1,7 °С. Однако наибольшие изменения претерпела южная часть исследуемой области, повышение температуры воздуха для нее в среднем составило 2,4 °С. В апреле зафиксировано равномерное изменение среднемесячной температуры воздуха для всех станций. Увеличение на всей территории составило 1,4 °С. В марте и апреле изменения статистически значимы для всех 16 станций, в мае — для 15 станций. В табл. 3 представлены все станции со статистически значимыми (полужирный курсив) и незначимыми изменениями среднемесячной температуры воздуха весеннего сезона.

Таблица 3

Статистическая оценка значимости изменений среднемесячной температуры воздуха весеннего сезона за период с 1989 г. по 2018 г. по сравнению с периодом с 1959 г. по 1988 г. ( $\Delta t$ )\*

Statistical assessment of the significance of changes in the average monthly air temperature of the spring season for the period 1989—2018 compared to 1959—1988 ( $\Delta t$ )

	Калевала	Койнас	Онега	Сортавала	Петро-ск	Вытегра	Котлас	СПб.	Вел. Луки	Смоленск	Вологда	Кострома	Ниж. Нов.	Москва	Тамбов	Курск
Март																
$\Delta t$	<b>1,6</b>	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,7</b>	<b>1,1</b>	<b>1,2</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,3</b>	<b>2,5</b>	<b>0,8</b>	<b>1,4</b>	<b>1,7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,9</b>	<b>2,6</b>
SE	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Апрель																
$\Delta t$	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>	<b>1,6</b>	<b>1,7</b>	<b>1,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>	<b>1,2</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>
SE	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

	Калевала	Койнас	Онега	Сортавала	Петро-ск	Вытегра	Котлас	СПб.	Вел. Луки	Смоленск	Вологда	Кострома	Ниж. Нов.	Москва	Тамбов	Курск
	Май															
$\Delta t$	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	0,2	<b>0,6</b>
SE	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

\* полужирным шрифтом выделены значимые отклонения  $\Delta t$

### Анализ условий формирования аномального термического режима весны на Европейской территории России

Для весны также рассчитано число случаев аномально высоких и аномально низких среднесуточных температур воздуха за первый и второй периоды. Общее число случаев по всей исследуемой области за два периода представлено в табл. 4.

Таблица 4

Число аномально теплых и аномально холодных дней весеннего периода

Frequency of anomalously warm and anomalously cold days in spring

Период, годы	Аномально холодные дни, число	Аномально теплые дни, число
1959—1988 гг.	4952	5695
1989—2018 гг.	5160	5171
Изменение	208	-524

Из табл. 4 видно, что повторяемость дней с аномально низкими значениями среднесуточной температуры воздуха растет, а повторяемость дней с аномально высокими значениями температуры воздуха уменьшается. Практически на всей исследуемой территории наблюдается увеличение повторяемости дней с аномально низкими значениями среднесуточной температуры воздуха. Только на станциях Койнас, Котлас, Вологда и Курск число дней с аномально низкой температурой воздуха уменьшается. Кроме того, на всех станциях, исключая Курск, наблюдается уменьшение повторяемости дней с аномально высокими значениями среднесуточной температуры воздуха.

С помощью программы ГИС MapInfo были построены карты пространственного распределения изменения повторяемости аномальных значений среднесуточной температуры воздуха весной (рис. 6). Хотя количество дней с аномально высокими температурами воздуха в общем числе уменьшается, небольшой рост отмечается на юге территории. При этом число аномально холодных дней растет. Максимальный рост повторяемости холода наблюдается в северо-западной и юго-восточной частях области исследования (рис. 6 б). Интересно, что в северо-восточной части области исследования наблюдается сокращение как аномально теплых дней, так и аномально холодных.



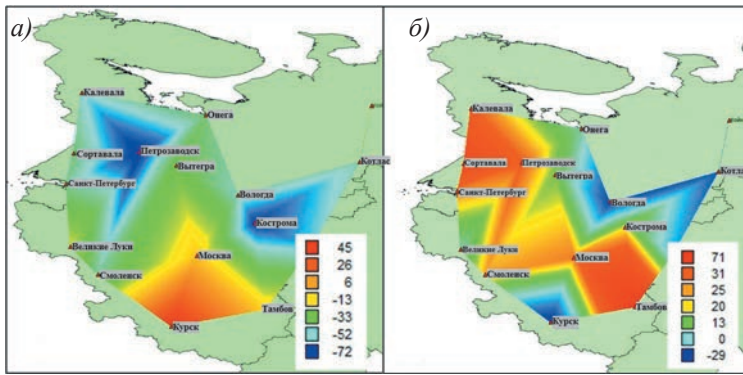


Рис. 6. Пространственное распределение изменения повторяемости anomalously высоких (а) и anomalously низких (б) значений среднесуточной температуры воздуха в течение 1989—2018 гг. по сравнению с 1959—1988 гг. в днях.

Fig. 6. Spatial distribution of frequency change anomalously high (a) and low (b) values of the average daily air temperature.

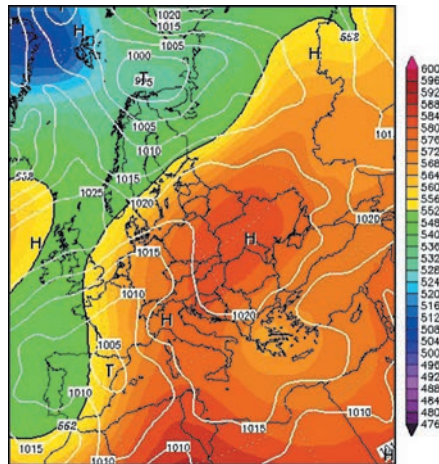


Рис. 7. Синоптическая ситуация (АТ–500+МЛСП), характерная для anomalously теплых дней весной на примере 28.04.2012.

Черная изолиния — ПВФЗ. Белые изолинии — давление над уровнем моря.  
Шкала справа — высота поверхности АТ-500 в Гп.дам.

Fig. 7. Synoptic situation typical for anomalously warm days in spring 04/28/2012 (АТ—500+МЛСП).  
Black isoline — high altitude frontal zone. White isolines — pressure above sea level.  
The scale on the right is the height of the АТ—500 surface in gp.dam.

Рассмотрим типовые синоптические ситуации, для которых характерны anomalously значения среднесуточной температуры воздуха весной. На рис. 7 представлена синоптическая ситуация, характерная для дней с anomalously высокими

значениями среднесуточной температуры воздуха. Рассматриваемая область находится под влиянием малоградиентной восточной периферии антициклона, расположенного над Украиной. Антициклон прослеживается от приземного слоя до высоты 5 километров, его приземный и высотный центры совпадают. Мощные нисходящие движения и отсутствие облачности способствуют дополнительному прогреву воздуха. Воздушные массы над ЕТР максимально прогреты, над всей территорией устанавливаются anomalно высокие значения температуры воздуха.

На рис. 8 представлена синоптическая ситуация, характерная для дней с anomalно низкими значениями среднесуточной температуры воздуха. Погоду над областью исследования определяет перемичка высокого давления, а отсутствие облачности способствует дополнительному выхолаживанию, вследствие чего температура воздуха достигает anomalно низких значений. Отметим, что нами были рассчитаны расстояния между изобарами для малоградиентных барических полей, которые составляли от 530 км до 890 км.

В работе была выявлена интересная синоптическая ситуация, характерная для anomalно теплых дней весной. Над арх. Шпицберген, Норвегией, Великобританией и Северной Европой в тыловой части циклона наблюдается полярное вторжение холодных воздушных масс на высоте 5 км (например, 26.04.2016). Область исследования находится в зоне взаимодействия передней части циклона с центром над Датским проливом и западной периферии обширного антициклона с центром над арх. Новая Земля. Высокоградиентное поле приземного давления

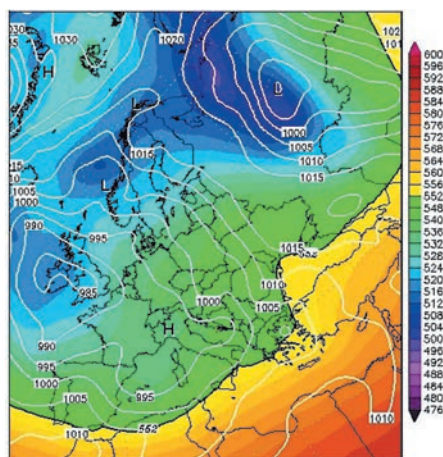


Рис. 8. Синоптическая ситуация (АТ—500+МЛСП), характерная для anomalно холодных дней весной на примере 06.03.2018.

Черная изолиния — ПВФЗ. Белые изолинии — давление над уровнем моря.

Шкала справа — высота поверхности АТ-500 в Гп.дам.

Fig. 8. Synoptic situation typical for anomalно cold days in spring 03/06/2018 (АТ—500+МЛСП).

Black isoline — high altitude frontal zone. White isolines — pressure above sea level.

The scale on the right is the height of the АТ—500 surface in gp.dam.



способствовало усилению адвекции, в результате чего воздушные массы приносят с юго-востока аномальное тепло на ЕТР.

Выявленные в данной работе синоптические ситуации, типичные для формирования аномальных значений температуры воздуха на большей части исследуемой территории, можно использовать в оперативной практике для заблаговременного определения данного опасного метеорологического явления.

### **Заключение**

На исследуемой территории для каждого пункта наблюдается увеличение среднемесячных значений температуры воздуха для осеннего и весеннего периодов. Были определены точки бифуркации в ряде среднегодовой температуры воздуха. На севере смена тренда наступает раньше, чем на юге, а в центральной части позже всего. Можно предположить, что такие изменения связаны с неустойчивым положением полярного и арктического фронтов, которое отмечается при глобальном изменении климата. Осенью повторяемость аномально теплых и аномально холодных дней за весь исследуемый период практически не изменилась. Весной повторяемость аномально холодных дней растёт, а повторяемость аномально теплых дней уменьшается.

В результате пространственного анализа аномального режима температуры воздуха можно заключить, что весной небольшой рост повторяемости аномально теплых дней отмечается на юге территории. Максимальный рост повторяемости аномально холодных дней наблюдается в северо-западной и юго-восточной частях области исследования.

Были выделены характерные синоптические ситуации для аномально холодных и аномально теплых дней весны и осени. В осенний период аномально теплые дни наблюдались под влиянием на область исследования малоградиентного поля высокого давления, при этом положение ПВФЗ смещено более чем на 1500 км севернее ее среднесезонного положения, что может являться неблагоприятным фоном для возникновения аномальных значений температуры воздуха. Также аномально высокая среднесуточная температура воздуха отмечалась при влиянии центральной и восточной периферий стационарных высоких антициклонов, имеющих Азорское происхождение.

В случае аномально холодных дней область исследования находилась под влиянием тыловой части арктических циклонов, при этом наблюдался очаг холода над Баренцевым морем.

Весной аномально теплые дни были зафиксированы на восточной периферии стационарного антициклона с квазивертикальной пространственной осью. Аномально холодные дни отмечались при малоградиентном поле барической седловины, выходящей на Баренцево море.

### **Список литературы**

1. Wiesner S., Eschenbach A., Ament F. Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg // *Meteorologische Zeitschrift*. 2014. Vol. 23. P. 143—157. doi: 10.1127/0941-2948/2014/0571.

2. Faccia D., Parker M., Stracca L. Feeling the Heat: Extreme Temperatures and Price Stability // ECB Working Paper. 2021. No. 2626. doi: 10.2866/185550.
3. Shulski M., Walsh J., Stevens E., Thoman R. Diagnosis of extended cold-season temperature anomalies in Alaska // *Monthly Weather Review*. 2010. Vol. 138. P. 453—462. doi: 10.1175/2009MWR3039.1.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf\\_download/doklad\\_klimat2020.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf) (дата обращения 15.04.2023).
5. Крышнякова О. С., Малинин В. Н. Особенности потепления климата Европейской территории России в современных условиях // *Общество. Среда. Развитие*. 2008. № 2(7). С. 115—124.
6. Кононова Н. К., Хмелевская Л. В. Многолетние колебания дат начала и продолжительности циркуляционных сезонов внетропических широт Северного полушария // *Известия РАН. Сер. Геогр.* 2011. № 3. С. 43—62.
7. Алексеева Е. Г., Анискина О. Г. Влияние циркуляции атмосферы на экстремальную температуру воздуха на Северо-Западе России // *Климатические риски и космическая погода: материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой: Иркутск, 14—17 июня 2021 года*. Иркутск: Иркутский государственный университет. 2021. С. 238—242.
8. Frigge M., Hoaglin D. C., Iglewicz B. Some Implementations of the Boxplot // *The American Statistician journal*. 1989. Vol. 43. P. 50—54.
9. Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Влияние метрик на определение точек бифуркации во временных рядах метеорологических величин // *Гидрометеорология и экология*. 2019. № 59. С. 28—42. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-28-40
10. Suranjana S., Shrinivas M., Hua-Lu P. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010. Vol. 91. № 8. P. 1015—1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
11. Малинин В. Н., Гурьянов Д. А. Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге // *Известия Русского географического общества*. 2015. Т. 147. № 5. С. 17—27.
12. Карлин Л. Н., Ефимова Ю. В., Никифоров А. В. Некоторые климатические характеристики Санкт-Петербурга в эпоху глобального потепления // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2005. № 1. С. 22—29.
13. Восканян К. Л., Иванова Т. И., Кузнецов А. Д. и др. Анализ смены периодов климатической стабильности северной территории России // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 67. С. 207—220. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-207-220.
14. Разоренова О. А. Климатология высотных фронтальных зон Северного полушария в зимний период // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 1. С. 5—16.
15. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. Учебник. Л.: Гидрометеоздат. 1991. 612 с.
16. Киселева Е. М., Волобуева О. В. Анализ температурного режима полярных и приполярных областей // *Материалы ежегодной международной научно-практической конференции LXXV Герценовские чтения «География: развитие науки и образования»*. СПб., 2022. С. 130—135.

### References

1. Wiesner S., Eschenbach A., Ament F. Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg. *Meteorologische Zeitschrift*. 2014;(23):143—157. doi: 10.1127/0941-2948/2014/0571.
2. Faccia D., Parker M., Stracca L. Feeling The Heat: Extreme Temperatures and Price Stability. *ECB Working Paper*. 2021;(2626). doi: 10.2866/185550.
3. Shulski M., Walsh J., Stevens E., Thoman R. Diagnosis of extended cold-season temperature anomalies in Alaska. *Monthly Weather Review*. 2010; (138): 453—462. doi: 10.1175/2009MWR3039.1.
4. Report on the climate features in the Russian Federation for 2020. Available at: [https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf\\_download/doklad\\_klimat2020.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf) (accessed on 15.04.2023).
5. Kryshnyakova O. S., Malinin V. N. Features of climate warming in the European territory of Russia in modern conditions. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye = Society. Environment. Development*. 2008; 2(7):(115—124). (In Russ.).

6. Kononova N. K., Khmelevskaya L. V. Long-term fluctuations of beginning dates and duration of circulation seasons of extra-tropical latitudes of northern hemisphere. *Izvestiia RAN. Ser: Geografiia = Proceedings RAN. Ser: Geography*. 2011; (3):(43—62). (In Russ.).
7. Alekseeva E. G., Aniskina O. G. The influence of atmospheric circulation on extreme air temperatures in the North-West of Russia. *Klimaticheskiiye riski i kosmicheskaya pogoda: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati Niny Konstantinovny Kononovoy = Climate risks and space weather: proceedings of the International Conference dedicated to the memory of Nina Konstantinovna Kononova*. Irkutsk: Irkutsk State University. 2021:(238—242). (In Russ.).
8. Frigge M., Hoaglin D. C., Iglewicz B. Some Implementations of the Boxplot. *The American Statistician journal*. 1989; 439(1):50—54.
9. Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S., Simakina T. E. Influence of Metrics on Determination of Bifurcation Points in Time Series of Meteorological Values. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (59):(28—40). (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-28-40.
10. Suranjana S., Shrinivas M., Hua-Lu P. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010;91(8):1015—1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
11. Malinin, V. N., Guryanov D. A. Interannual variability of climatic seasons in St. Petersburg. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = News of the Russian Geographical Society*. 2015; 147(5):(17—27). (In Russ.).
12. Karlin L. N., Efimova Yu. V., Nikiforov A. V. Some climatic characteristics of St. Petersburg in the era of global warming. *Scientific notes of the RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2005;(1):(22—29). (In Russ.).
13. Voskanyan K. L., Ivanova T. I., Kuznetsov A. D. et al. Analysis of the changes of periods of climatic stability in the northern territory of the Russian Federation. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (67):(207—220). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-207-220.
14. Razorenova O. A. Climatology of high-altitude frontal zones of the Northern Hemisphere in winter. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2016; (1):(5—16). (In Russ.).
15. Vorobyov V. I. *Synopticheskaya meteorologiya = Synoptic meteorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991:612 p. (In Russ.).
16. Kiseleva E. M., Volobueva O. V. Analysis of the temperature regime of the polar and subpolar regions. *Materialy yezhegodnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii LXXXV Gertsenskiye chteniya «Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya» = Annual international scientific and practical conference LXXXV Herzen readings "Geography: development of science and education*. 2022; (130—135). (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*Татьяна Романовна Шишкина*, синоптик 2 категории Северо-Западное УГМС, специалист по учебно-методической работе Российский государственный гидрометеорологический университет, [tana-sakura@mail.ru](mailto:tana-sakura@mail.ru).

*Юлия Викторовна Ефимова*, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, [luluef@mail.ru](mailto:luluef@mail.ru).

*Ирина Викторовна Лаврова*, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ведущий научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт, [livspb@yandex.ru](mailto:livspb@yandex.ru).

*Ирина Александровна Иванова*, старший преподаватель кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, [ira.nova@mail.ru](mailto:ira.nova@mail.ru).

*Екатерина Петровна Иванова*, начальник отдела сопровождения учебного процесса Учебно-методического управления, Российский государственный гидрометеорологический университет, [el.ivanova@rshu.ru](mailto:el.ivanova@rshu.ru).

***Information about authors***

*Tatyana Romanovna Shishkina*, 2nd category weather forecaster North-West UGMS, specialist in educational and methodological work Russian State Hydrometeorological University.

*Yulia Viktorovna Efimova*, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Meteorological Forecasts Russian State Hydrometeorological University.

*Irina Viktorovna Lavrova*, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Meteorological Forecasts Russian State Hydrometeorological University, leading researcher State Scientific Research Navigation and Hydrographic Institute.

*Ivanova Irina Aleksandrovna*, senior lecturer of the Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University.

*Ekaterina Petrovna Ivanova*, Head of the Department for Supporting the Educational Process of the Educational and Methodological Directorate Russian State Hydrometeorological University.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 23.04.2023*

*Принята к печати после доработки 25.11.2023*

*The article was received on 23.04.2023*

*The article was accepted after revision on 25.11.2023*

Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 73—86.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):73—86.

## ***ГИДРОЛОГИЯ***

Научная статья  
УДК [556.142:556.166]: 551.583(470.57)«321»  
doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-73-86

### **Влияние климатических изменений на водопоглотительную способность почв речных бассейнов Республики Башкортостан**

***Валерий Иванович Барышев, Игорь Леонидович Калюжный***

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия, hfl@mail.ru

*Аннотация.* В статье дана оценка изменения водопоглотительной способности почв речных бассейнов Республики Башкортостан. Установлено, что в период снеготаяния в почвах речных бассейнов образуется водонепроницаемый слой. Он наблюдается как в период стабилизации климата, так и при его изменении. Среднемесячная температура почвы февраля  $-2^{\circ}\text{C}$  и ниже на глубине 0,20 м является показателем степени отсутствия на водосборе участков с тальми почвами, при которой потери талого стока отсутствуют или они наименьшие. Согласно этому критерию, на основе натурных наблюдений, показано, что при климатических изменениях водопоглотительная способность почвы речных водосборов возросла, а условия образования водонепроницаемого слоя уменьшились.

*Ключевые слова:* водопоглотительная способность, водонепроницаемый слой, весеннее половодье.

*Для цитирования:* Барышев В. И., Калюжный И. Л. Влияние климатических изменений на водопоглотительную способность почв речных бассейнов Республики Башкортостан // Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 73—86. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-73-86.

## ***HYDROLOGY***

Original article

### **Impact of Climatic Changes on Water Absorption Capacity of River Basin Soils of the Republic of Bashkortostan**

***Valerii I. Baryshev, Igor L. Kalyuzhny***

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia, hfl@mail.ru

*Summary.* As a result of global climate warming, the conditions for the formation of river flows change significantly, especially during the spring flood. One of the factors leading to these changes is the water absorption capacity of the watershed soils. The latter depends on infiltration losses of melt runoff. When forming a waterproof layer, the mentioned losses depend on its power and duration of existence. To assess

its formation on the river basins of the Republic of Bashkortostan, the methodology given in the works [1, 7, 8] was used. When implementing this method, non-trivial characteristics of chernozems, gray-forest and sod-podzolic soils of the Don River basin were used. According to genetic signs, the soils of this region are close to the soil types of the Republic of Bashkortostan of the same name. The presence and thickness of the watertight layer during the formation of spring flood was determined by a number of river basins using data from observations (1972—1985) of the temperature and humidity of soils. It was established that a waterproof layer is observed annually in 3—9 points (out of 13) on the catchment of the White River, i.e., from 20 to 70 %. Its average power, attributed to the total number of meteorological stations, the data of which are taken into account (13), is 13 cm. At certain observation points it reaches 90 cm. The duration of existence is different — from 2—3 days to 55 or more. The formation of a watertight layer occurs both during the period of stabilization of climatic characteristics and during their changes. An indicator of the degree of absence of areas with melt soils on the catchment, in which there are no losses of melt runoff or they are the smallest, is the average monthly soil temperature in February,  $-2^{\circ}\text{C}$  and below, at a depth of 0,20. It has been established that at this temperature on river catchments, the soil freezes to a depth of 60 cm or more. Taking this indicator as a criterion, and based on the analysis of the results of observations of soil temperature, an assessment was made of the change in the water absorption capacity of the soils of river watersheds under climatic changes. It was established that during the period of stable climate, the average monthly temperature of February  $-2^{\circ}\text{C}$  and below (at a depth of 0,20 m) was observed in 52,8 % of cases. Under climatic changes, it dropped to 17,9 %. The water absorption capacity of the soil has increased. The infiltration component of melt runoff losses under climatic changes also increases, and the possibility of formation of a watertight layer decrease.

*Keywords:* water absorption capacity, watertight layer, spring flood.

*For citation:* Baryshev V. I., Kalyuzhny I. L. Impact of Climatic Changes on Water Absorption Capacity of River Basin Soils of the Republic of Bashkortostan. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):73—86. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-73-86.

## Введение

Исследование закономерностей формирования весеннего половодья началось еще в прошлом веке, но ввиду сложности процесса роль ряда факторов была недостаточно четко определена. Большинство исследователей не уделяло должного внимания процессу теплофизического взаимодействия талых вод с мерзлой почвой.

В Государственном гидрологическом институте в период с 1973 г. по 1980 г. под руководством В. А. Румянцева были организованы крупномасштабные экспедиционные, стационарные и лабораторные исследования процессов формирования стока весеннего половодья в бассейнах рек лесостепной и лесной зон ЕТС. В процессе лабораторных и натуральных гидрофизических исследований впервые был выявлен факт образования в промерзшей почве запирающего водонепроницаемого слоя и осуществлена его параметризация [1]. Установлено, что этот процесс является определяющим фактором при оценке водопоглотительной способности почвы речного водосбора в период формирования талого стока. Возможность заблаговременной оценки водопоглотительной способности речных бассейнов определяет достоверность долгосрочных прогнозов весеннего половодья и позволяет совершенствовать методы расчета и прогноза талого стока [2, 3, 4].

## Цели исследования

Исследование закономерностей водопоглощения речных бассейнов и оценка их временных изменений, обусловленных глобальным потеплением климата [5],



является весьма актуальной проблемой для конкретных регионов России [2, 4, 6]. Исследования в бассейне р. Волги показали, что изменения весеннего стока носят разнонаправленный характер: на 30 % частных водосборов наблюдается рост стока весеннего половодья, на 70 % — его уменьшение [7, 8, 9]. Уменьшение талого стока однозначно свидетельствует об изменении водопоглотительной способности речного бассейна.

Для бассейнов рек Республики Башкортостан оценка изменений водопоглотительной способности осложняется тем, что они располагаются как в предгорной, так и в горной части Урала, охватывая при этом лесостепную и степную зоны. Учитывая вышеизложенное, целью работы является оценка возможности образования в почвах речных бассейнов водонепроницаемого слоя в период весеннего половодья и изменения их водопоглотительной способности в условиях потепления климата.

### **Методы достижения поставленной цели**

В основу исследования положены результаты многолетних наблюдений за характеристиками гидрологического и метеорологического режимов речных бассейнов Республики Башкортостан, а также результаты исследований в бассейне р. Дон и разработанной на этой основе методики определения образования водонепроницаемого слоя в период весеннего половодья [1, 8].

На основе теоретических и полевых работ в бассейне р. Дон установлено, что кристаллизация воды в крупных порах обуславливает изменения водопроницаемости почвы, а при полной закупорке водопроводящих пор наступает период прекращения инфильтрации. На определенной глубине образуется водонепроницаемый слой (ВС). Критическая температура, при которой он образуется, соответствует влажности почвы на момент начала снеготаяния. Её определение и расчет для почв, содержащих незамерзающую влагу при отрицательной температуре, изложены в работе [1]. Используя наблюденные значения влажности и температуру почвы в период, предшествующий снеготаянию, а также рассчитанные значения критической температуры, определяют возможность образования ВС и его характеристики.

Оценка образования ВС в период весеннего половодья с использованием методики, изложенной в работе [1], требует сведений о ряде водно-физических характеристик, которые определяются только в лабораторных условиях (содержание незамерзшей почвенной влаги при отрицательной температуре, теплофизические характеристики талых и мерзлых почв и ряд других).

Экспериментальные определения этих нетривиальных характеристик водно-физических свойств почв бассейнов рек Верхней Волги, Дона и других регионов однозначно показали, что наблюдается их незначительная пространственная изменчивость в пределах конкретного типа почв и их генетических горизонтов [1]. Это позволяет использовать ранее полученные характеристики по типам почв для неисследованных регионов.

В бассейнах рек Республики Башкортостан представлены типы почв, свойственные степной, лесостепной и лесной зонам:

— черноземы, формирующиеся под степной и лесостепной растительностью;

— серые лесные почвы, развивающиеся под широколиственными и смешанными лесами;

— дерново-подзолистые почвы, образующиеся под хвойными лесами.

Подробное их описание приведено в работе [10], а агрофизические свойства массово определяются на сети агрометеорологических станций.

Аналогичные типы почв господствуют в бассейнах рек Дона и Вятки. Учитывая сказанное, используем результаты определений нетривиальных характеристик водно-физических свойств почв бассейна р. Дон [1] для почв бассейнов рек Республики Башкортостан, где эти характеристики не определялись. В табл. 1 приведены рассчитанные по методикам, приведенным в работе [1], значения критической температуры для почв речных бассейнов Республики Башкортостан.

Таблица 1

Оценка критической температуры и начальной влажности почвы, соответствующих условиям образования водонепроницаемого слоя при инфильтрации талых вод (влажность в долях от массы сухой почвы)

Assessment of critical temperature and initial soil moisture corresponding to conditions of formation of watertight layer during melt water infiltration (humidity in fractions of dry soil weight)

Глубина слоя, см	Объемная масса твердой фазы почвы, г/см <sup>3</sup>	Критическая температура, °С					
		0,0	-1,0	-3,0	-5,0	-10,0	-20,0
Чернозем обыкновенный, среднесуглинистый							
0—60	0,80	0,664	0,588	0,554	0,532	0,497	0,440
	0,90	0,630	0,547	0,508	0,488	0,451	0,391
	1,00	0,595	0,507	0,466	0,445	0,406	0,343
	1,10	0,560	0,468	0,421	0,397	0,360	0,312
	1,20	0,527	0,427	0,379	0,357	0,338	0,302
	1,30	0,492	0,389	0,360	0,347	0,324	0,288
	1,40	0,457	0,379	0,352	0,337	0,314	0,275
Чернозем обыкновенный, тяжелосуглинистый и легкосуглинистый							
0—20	1,00	0,614	0,584	0,489	0,470	0,432	0,366
0—40	1,15	0,556	0,534	0,438	0,407	0,368	0,308
30—60	1,25	0,517	0,500	0,396	0,365	0,324	0,280
	1,35	0,489	0,476	0,365	0,334	0,312	0,271
40—80	1,35	0,500	0,378	0,357	0,339	0,304	0,263
60—80	1,40	0,482	0,360	0,336	0,320	0,299	0,256
60—80	1,45	0,463	0,342	0,325	0,315	0,292	0,249
Темно-серые лесные почвы							
0—10	0,80	0,658	0,545	0,506	0,492	0,457	0,401

Глубина слоя, см	Объемная масса твердой фазы почвы, г/см <sup>3</sup>	Критическая температура, °С					
		0,0	-1,0	-3,0	-5,0	-10,0	-20,0
10—20	0,90	0,626	0,497	0,458	0,441	0,406	0,350
30—70	1,00	0,592	0,451	0,409	0,390	0,355	0,312
	1,10	0,563	0,406	0,364	0,354	0,337	0,305
	1,20	0,526	0,382	0,358	0,350	0,330	0,296
	1,40	0,463	0,377	0,350	0,337	0,315	0,280

На рис. 1 приведены условия образования водонепроницаемого слоя по данным метеорологической станции Чишмы 26.02.1979 г. в бассейне р. Демы.

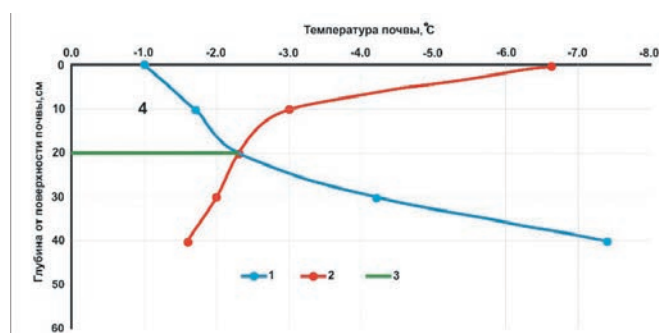


Рис. 1. Образование водонепроницаемого слоя в период весеннего половодья в бассейне р. Демы по данным наблюдений мс. Чишмы:

- 1 — критическая температура почвы, 2 — наблюдаемая температура почвы,  
3 — нижняя граница водонепроницаемого слоя, 4 — мерзлый слой.

Fig. 1. Formation of a waterproof layer during the spring flood in the Dema River basin according to observations of the Chishmy weather station:

- 1 — critical soil temperature, 2 — observed soil temperature,  
3 — lower boundary of watertight layer, 4 — frozen layer.

Как следует из рис. 1, нижняя граница ВС располагается на глубине 20 см от поверхности почвы. Мощность этого слоя — 20 см. Анализ образования водонепроницаемого слоя на речных водосборах показывает, что он образуется как на поверхности почвы, так и на некоторой глубине, а также может быть и многослойным.

Установлено, что в черноземных почвах бассейна р. Дон водонепроницаемый слой образуется при высокой влажности и температуре верхних горизонтов почвы от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $-4^{\circ}\text{C}$  и ниже [1]. Это позволяет использовать многолетние результаты наблюдений за температурой почвы (по вытяжным почвенно-глубинным термометрам ТМ10) для оценки её водопоглотительной способности при климатических изменениях.

## Обсуждение полученных результатов

Оценка образования ВС в бассейнах рек УГМС Республики Башкортостан крайне ограничена наличием материалов натурных наблюдений как по температуре почвы, так и её влажности в зимний или предвесенний периоды. Для исследования был определен период с 1972 г. по 1985 г., за который были данные наблюдений 13-ти метеорологических станций, расположенных в пределах бассейна р. Белой до г. Бирска. В несколько сокращенном виде данные о наличии и мощности ВС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наличие и мощность водонепроницаемого слоя (см) в период формирования весеннего половодья в бассейне р. Белой по данным наблюдений за 1972—1985 гг.

The presence and thickness of the waterproof layer (cm) during the formation of spring flood in the basin of the Belaya River according to observations for 1972—1985

Год	Речной бассейн									
	р. Белая				р. Дема		р. Ай		р. Инзер	р. Сюнь
	Куш-нареново	Стерлитамак	Ме-леуз	Мраково	Чишма	Аксаково	Емаша	Дуван	Архангельское	Бакалы
1972	21	40	90	26	*	*	28:17	*	20	*
1973	*	21	26:42	24	*	*	25:25	24:18	11	8
1974	11	30	10:46	*	*	*	25:24	13:6	21	*
1975	*	35	*	*	14	30	26:25	*	*	46
1976	*	*	43	16	*	—	*	*	6	*
1977	6	34	14:54	27	*	—	17	32:13	*	*
1978	*	30	*	27	18	—	22	36	11	20
1979	*	21	*	*	20	—	*	44	23	26
1980	*	22	*	26	*	—	70	26	*	*
1981	*	20	*	20	9	10	22	*	10	19
1982	*	31	*	33	*	10	11:9	*	*	9
1983	20	31	11	*	7	10	*	18	*	20
1984	21	17	23	22	*	14	23:16	90	6	*
1985	76	*	*	*	7	*	13	90	10	*
Повторяемость, в процентах	43	86	50	64	43	14	85	64	64	50
Средняя мощность, см	11	24	26	16	5	3	31	30	8	11
Наибольшая мощность, см	76	40	90	33	20	14	70	90	23	46

Примечание: знак \* обозначает, что водонепроницаемый слой не мог образоваться

Согласно табл. 2, ВС наблюдается ежегодно в 3—9 пунктах (из 13) на водосборе р. Белой, т. е. от 20 % до 70 %. Его средняя мощность, рассчитанная как частное от деления суммы наблюденных значений, отнесенных к общему числу

метеорологических станций (13), равна 13 см. При этом в отдельных пунктах наблюдений его мощность достигает 90 см.

Продолжительность существования ВС весьма различна: от 2—3 до 55 и более суток. Приведем результат расчета по мс. Чишмы. Так, в 1975 г. ВС образовался 31 марта и полностью растаял 4 мая, т. е. существовал 51 сутки; в 1978 г. образовался 31 марта и существовал до 28 апреля, т. е. 19 суток; в 1979 г. образовался 21 апреля и растаял 10 мая. Результаты расчета по мс. Мелеуз показывают, что время его существования в 1972 г. было равно 55 суткам, в 1977 г. — 29 суткам. Существование ВС в отдельные весны приближается к продолжительности половодья.

Водонепроницаемый слой может образоваться в любое время зимнего периода. Если не создаются условия для оттаивания зимой, то в этом слое почвы сохраняются его инфильтрационные способности вплоть до конца снеготаяния и оттаивания весной. Фазовые превращения влаги в мерзлой почве могут начаться еще до начала снеготаяния или в его процессе. Происходит это только в тонких порах, не влагонепроницающих, которые практически не принимают участия в формировании талого стока. Лед в водопроницающих порах сохраняется до наступления нулевых температур почвы [1].

В табл. 3 приведена динамика температур в почве при формировании талого стока. Анализ таблицы показывает, что на глубине до 70 см в бассейне р. Демы отрицательная температура в почве сохраняется до марта месяца. На р. Ай отрицательная температура сохраняется на протяжении всего периода весеннего половодья.

Таблица 3

Динамика среднемесячных температур (°С) при формировании стока весеннего половодья на р. Демы (1984 г.) и р. Ай (1984 г., 1985 г.)

Dynamics of average monthly temperatures (°C) in the formation of spring flood runoff on the Dema River (1984) and Ai River (1984, 1985)

Мощность водонепроницаемого слоя, см	Промерзание, см	Глубина от поверхности, см	Месяц				
			январь	февраль	март	апрель	май
мс. Раевский. Река Дема до д. Бочкарева, 1984 г.							
30	110	20	-3,7	-2,1	-2,4	7,4	13,0
		40	-1,6	-1,3	-1,7	4,6	10,3
		80	1,8	1,0	0,4	2,5	7,3
мс. Дуван. Река Ай до г. Златоуст, 1984 г.							
90	107	20	-2,2	-5,1	-2,4	-0,2	7,6
		40	-0,7	-3,3	-1,8	-0,3	4,2
		80	1,3	-0,1	-0,5	-0,1	1,3
мс. Дуван. Река Ай до г. Златоуст, 1985 г.							
90	127	20	-6,0	-5,6	-4,1	0,1	5,6
		40	-4,1	-4,0	-3,2	-0,3	2,7
		80	-1,0	-1,6	-1,7	-0,5	-0,1

На основании ранее выполненных работ на водосборах рек в бассейне Дона и Верхней Волги установлено, что между глубиной промерзания и ВС существует определенная зависимость. При глубине промерзания менее 30 см водонепроницаемый слой не превышает 5—10 см, существует кратковременно или не обнаруживается. При глубине промерзания почвы 60 см и более ВС составляет в среднем 25 см. В этом случае на водосборах, занятых полевыми угодьями, практически полностью исчезают участки с талыми и слабопромерзшими почвами, потери талых вод на инфильтрацию становятся наименьшими и не превышают 15—20 мм [1, 8].

Подтверждением длительного существования водонепроницаемого слоя является высокий коэффициент талого стока. При мощности ВС, равного 90 см (р. Ай — с. Лаклы, половодья 1984 г. и 1985 г.), коэффициент талого стока был равен 0,8—0,9; при мощности ВС в пределах 7—22 см (р. Дема — д. Бочкарева, половодья 1984 г. и 1985 г.) коэффициент равен 0,3—0,6.

Совместный анализ результатов расчетов образования ВС по ряду станций, приведенных в табл. 2, и полевых определений глубин промерзания, подтверждает ранее полученные результаты. При глубинах промерзания до 30 см на полевых участках речных водосборов преобладают области с талыми или слабопромерзшими почвами. При увеличении глубин промерзания до 60 см и выше они полностью исчезают.

Таким образом, глубины промерзания 60 см и более являются индикатором отсутствия на полевом водосборе слабопромерзших или талых почв.

В работе [1, 11] показано, что в черноземных почвах бассейна р. Дон ВС образуется при увлажнении, близком к наименьшей полевой влагоемкости (НВ), и температурах от  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. В западных, юго-западных и центрально-черноземных областях ЕТР влажность почв к началу снеготаяния в 85—95 % случаев близка или превосходит НВ. В восточных и южных районах этих зон и в степной зоне в конце зимы этот показатель достигает 50—80 % [1]. Наибольшая глубина промерзания почв на территории Башкортостана наблюдается в феврале, когда её температура практически не понижается. Отсюда следует, что среднемесячная температура почвы февраля  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже является показателем степени отсутствия на водосборе участков с талыми почвами. При температурах почвы выше  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдаются участки с талой почвой.

Анализ рядов наблюдений за глубиной промерзания и температурой почвы показывает, что глубина в 60 см как индикатор водонепроницаемости может наблюдаться и при иных низких температурах почвы.

По данным наблюдений мс. Дуван за период с 1968 г. по 1980 г. зависимость глубины промерзания почвы от среднемесячной температуры февраля на глубине 0,2 м возможно представить в виде (при  $R = 0,961$ ):

$$h = -10,975T + 52,14,$$

где  $h$  — глубина промерзания почвы, см;  $T$  — среднемесячная температура февраля на глубине 0,2 м.

Согласно приведенному уравнению, температуре почвы  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответствует глубина промерзания 74 см.



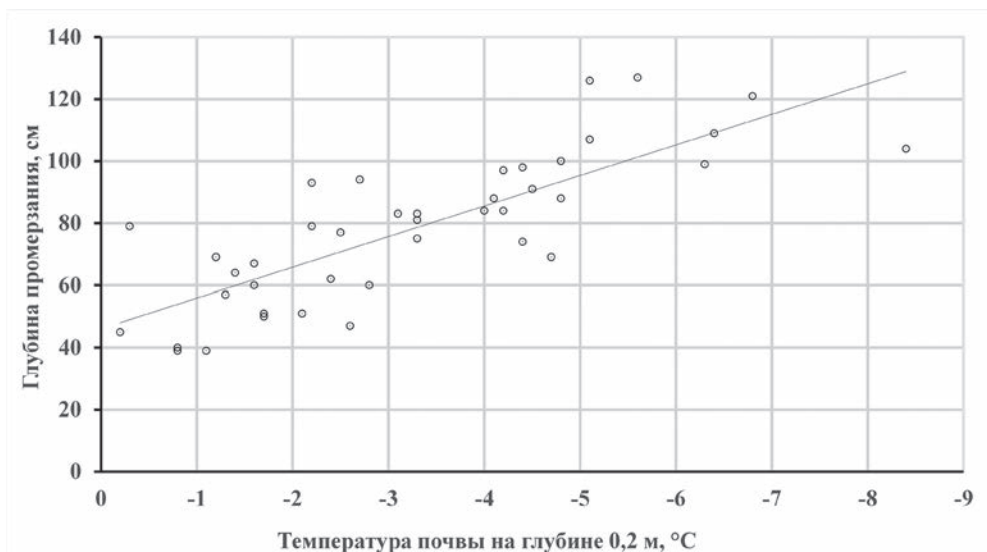


Рис. 2. Зависимость глубины промерзания почвы (оподзоленные черноземы) от среднемесячной температуры февраля на глубине 0,2 м, мс. Дуван, 1981 г.—2022 г.

Fig. 2. The dependence of the depth of soil freezing (podzolic chernozems) on the average monthly temperature of February at a depth of 0,2 m at the Duvan meteorological station, 1981—2022.

На этой же метеостанции за период климатических изменений с 1981 г. по 2022 г. аналогичная зависимость (рис. 2) описывается уравнением (при  $R = 0,961$ ):

$$h = -9,863T + 46,08.$$

Из данной формулы следует, что средней за февраль температуре  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответствует глубина промерзания 65 см.

В табл. 4 приведены аналогичные осредненные зависимости глубины промерзания почвы от среднемесячной температуры февраля на глубине 0,20 м по ряду других пунктов наблюдений. Полученные зависимости корректно описывают природный процесс, но имеют определенное ограничение в практическом плане использования: глубины промерзания приведены как наибольшие за зимний сезон, а температуры почвы — как среднемесячные значения за февраль, поэтому коэффициент корреляции полученных зависимостей снижается.

Подставив в полученные уравнения значение температуры почвы на глубине 20 см, равное  $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при которой, согласно [1], отсутствуют участки талой почвы, установим среднюю глубину промерзания почвы. Характерно, что средняя глубина промерзания при этой температуре для бассейнов рек, сложенных различными типами черноземов, за период наблюдений при измененных климатических характеристиках (с 1981 г. по 2017—2022 гг.) изменяется незначительно, от 63 до 69 см, составляя в среднем 66 см. Это на 6 см больше, чем предел (60 см) средней глубины, при котором не наблюдаются талые участки почв на черноземах р. Дон.

Зависимость глубины промерзания (см) речных водосборов от среднемесячной температуры почвы в феврале на глубине 0,20 м

The dependence of the freezing depth (cm) of river watersheds on the average monthly soil temperature in February at a depth of 0,20 m

Пункт наблюдений	Период наблюдений	Зависимость $h = f(T_{\text{фев.}})$	Коэффициент корреляции	Промерзание почвы (см) при температуре февраля $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , см
Дуван	1968—1980	$h = -10,975T + 52,14$	0,961	74
	1981—2022	$h = -9,863T + 46,08$	0,800	65
Зилаир	1962—1980	$h = -17,212T + 49,16$	0,863	84
	1981—2017	$h = -18,850T + 45,59$	0,815	83
Стерлитамак	1961—1980	$h = -22,344T + 43,93$	0,835	89
	1982—2022	$h = -11,909T + 44,80$	0,754	69
Раевский	1981—2013	$h = -7,119T + 48,61$	0,704	63
Чишмы	1981—2017	$h = -13,276T + 42,24$	0,827	69

На серых лесных почвах (мс. Зилаир) в обоих климатических периодах средняя глубина промерзания практически остается неизменной 83—84 см.

На рис. 3 приведена динамика температуры почвы по мс. Стерлитамак, мс. Чишмы и мс. Дуван за период с 1961 г. по 2022 г. Согласно приведенным на рисунке данным по мс. Стерлитамак, следует, что за период от начала наблюдений до 1981 г. наблюдалось 5 зим, при которых среднемесячная температура почвы февраля была ниже или равна  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. е. в 25 % от всех зим этого периода. За период климатических изменений данный показатель не превышает 12 %. Согласно этому условному критерию ( $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже), вероятность образования ВС значительно уменьшилась.

Анализ динамики среднемесячных температур февраля (рис. 3) свидетельствует о высокой синхронности хода температуры на глубине 0,20 м по этим станциям. Синхронность наблюдается как при квазистационарном климате, так и при изменении климатических характеристик.

В работе [8], исходя из анализа пространственно-корреляционной функции глубин промерзания почвы в бассейне р. Волги, установлено, что радиус положительной корреляции для лесной и лесостепной зон не превышает 290 км. Площадь, при которой будут наблюдаться только положительные парные коэффициенты корреляции, составляет 264 074 км<sup>2</sup>, что значительно больше территории Республики Башкортостан (143 600 км<sup>2</sup>). Для степной зоны этот радиус равен 1190 км. Различие в радиусах корреляции этих зон объясняется тем, что в степной зоне изменчивость факторов, обуславливающих процесс промерзания почвы, значительно меньше. Данный вывод распространяется и на бассейны рек Республики Башкортостан.

В табл. 5 приведены оценки изменения водопоглотительной способности почв до и после изменения климатических характеристик на территории республики. Использованы результаты наблюдений за температурой почвы по ряду станций за временные периоды от начала наблюдений до 1980 г. и с 1981 г. по 2022 г. (период



Рис. 3. Динамика среднемесячных температур почвы февраля на глубинах 0,20 м по метеостанциям за период с 1961 г. по 2022 г.:

1 — Стерлитамак, 2 — Чишмы, 3 — Дуван.

Fig. 3. The dynamics of the average monthly soil temperatures in February at depths of 0.20 m by meteorological stations for the period from 1961 to 2022:

1 — Sterlitamak, 2 — Chishmy, 3 — Duvan.

изменений климата). В качестве критерия принята среднемесячная температура почвы в феврале на глубине 0,20 м.

Таблица 5

Соотношение (в %) среднемесячных температур февраля  $-2^{\circ}\text{C}$  и ниже на глубине 20 см по ряду станций в периоды стационарных климатических характеристик и их изменений

Ratio (in percent) of average monthly temperatures of February  $-2^{\circ}\text{C}$  and lower at a depth of 20 cm for a number of stations during periods of stationary climatic characteristics and their changes

Метеорологическая станция, (тип почвы)	Процент случаев за период от года начала наблюдений до 1980 г.	Процент случаев за период от 1981 г. до 2022 г.
Стерлитамак (чернозем выщелоченный)	22	9,3
Чишмы (чернозем выщелоченный)	89	39
Бакалы (темно-серые лесные)	22	9,3
Зилаир (серые лесные)	17	7,0
Дуван (чернозем оподзоленный)	92	67
Башгосзаповедник (серые лесные)	75	39
Среднее	52,8	17,9

Оценки по приведенному ряду станций показывают, что во всех пунктах наблюдений происходят изменения водопоглотительной способности почв. В среднем за период стабильного климата на глубине 0,20 м среднемесячная температура февраля  $-2^{\circ}\text{C}$  и ниже наблюдалась в 52,8 % случаев. При климатических изменениях она понизилась до 17,9 %, т.е. водопоглотительная способность почвы возросла. В бассейнах рек, почвенный покров которых представлен черноземами, водопоглотительная способность увеличилась на 38,4 %, при серых лесных почвах — на 17,9 %. Как следствие, инфильтрационная составляющая потерь талого стока при климатических изменениях также возрастает [11], а возможность образования водонепроницаемого слоя уменьшается. К аналогичному выводу «о существенном сокращении случаев возникновения водонепроницаемого слоя на водосборах» водно-балансовых станций приходит исследователь в работе [12].

### Выводы

Дана оценка водопоглотительной способности почв речных водосборов при стабилизации климатических характеристик и в период их изменений. Наличие и характеристики водонепроницаемого слоя определялись по методике, изложенной в работе [1]. В качестве аналогов черноземам и лесным типам почв Республики Башкортостан приняты характеристики теплофизических свойств почв бассейна р. Дон. В работе использовались многолетние натурные наблюдения за температурой и влажностью почвы. Это позволило оценить возникновение и мощность водонепроницаемого слоя в мерзлой почве за период наблюдения с 1972 г. по 1985 г. Средняя его повторяемость равна 56 % при изменении от 14 до 86 %. На полевых участках речных водосборов при глубинах промерзания до 30 см преобладают области с тальми или слабопромерзшими почвами. При увеличении глубин промерзания до 60 см и выше они полностью исчезают.

Приведены осредненные зависимости глубины промерзания почвы от среднемесячной температуры февраля на глубине 0,20 м. Средняя глубина промерзания при этой температуре для бассейнов рек, сложенных черноземами, за период наблюдений при измененных климатических характеристиках изменяется незначительно — от 63 см до 69 см, составляя в среднем 66 см. На серых лесных почвах в обоих климатических периодах средняя глубина промерзания остается неизменной — от 83 см до 84 см.

Установлено, что среднемесячная температура почвы февраля  $-2^{\circ}\text{C}$  и ниже на глубине 0,20 м является показателем степени отсутствия на водосборе участков с тальми почвами, при котором потери талого стока отсутствуют или имеют наименьшее значение. Приняв в качестве критерия этот показатель, исходя из наблюдений за температурой почвы, дана оценка динамики водопоглотительной способности почв речных водосборов при климатических изменениях. В среднем за период стабильного климата на глубине 0,20 м среднемесячная температура февраля  $-2^{\circ}\text{C}$  и ниже наблюдалась в 52,8 % случаев. При климатических изменениях она понизилась до 17,9 %, т.е. водопоглотительная способность почвы возросла. В бассейнах рек, почвенный покров которых представлен черноземами,

водопоглотительная способность увеличилась на 38,4 %, при серых лесных почвах – на 17,9 %. Как следствие, инфильтрационная составляющая потерь талого стока при климатических изменениях также возрастает, а возможность образования водонепроницаемого слоя уменьшается. Полученные результаты соответствуют поставленным целям исследования.

### Список литературы

1. Калюжный И. Л., Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе. СПб.: Нестор-История. 2012. 616 с.
2. Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Джамалов Р. Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов Европейской части России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 36—47. doi: 10.35567/1999-4508-2018-4-3.
3. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. 2007. С. 20—32.
4. Горбаренко А. В., Варенцова Н. А., Киреева М. Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6—28. doi: 10.35567/1999-4508-2012-4-1.
5. Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные климатические причины // Гидрометеорология и экология. 2023. №70. С. 7—37. doi: 10.33933/2713-2023-70-7-37.
6. Лобанов В. А., Тошаква Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. 2016. №3 (38). С. 79—89. doi: 10.17072/2079-7877-2016-3-79-89.
7. Лавров С. А., Калюжный И. Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России. 2012. № 4. С. 74—84.
8. Калюжный И. Л., Лавров С. А. Изменчивость глубин промерзания почвы в бассейне р. Волга и ее влияние на процессы формирования зимнего и весеннего стока при изменениях климата // Метеорология и гидрология. 2016. №7. С. 58—71.
9. Лавров С. А., Калюжный И. Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42—60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
10. Чурагулов Р. С., Чурагулова З. С. Водно-физические свойства серых горнолесных почв долин Южного Урала в связи с гидрологической ролью горных лесов // Повышение плодородия почв в условиях интенсивной системы земледелия. 1986. С. 152—159.
11. Журавин А. С., Гуревич Е. В., Марков М. Л. Переходный период в перестройке системы влагооборота водосборов (по данным водобалансовой станции Каменная Степь) // Метеорология и гидрология. 2024. №1. С. 17—27.
12. Журавин С. А. Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России. СПб.: ООО «РИАЛ», 2022. 224 с.

### References

1. Kalyuzhnyi I. L., Lavrov S. A. *Gidrofizicheskie processy na vodosbore = Hydrophysical processes in the drainage area*. SPb.: Nestor-Istorija, 2012: 616 p.
2. Grigoryev V. Y., Frolova N. L., Dzhamalov R. G. The Water Balance Change of Large River Basins of the European Russia. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2018; (4): (36—47). (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2018-4-3.
3. Shiklomanov I. A., Georgievskiy V. Yu. Modern and perspective changes in the flow of Russian rivers due to the influence of climatic factors. *Vodnye resursy sushi v uslovijah izmenjajushhegosja klimata = Water resources of land in climate changes condition*. 2007; (23): (20—32). (In Russ.).

4. Gorbarenko A. V., Varentsova N. A., Kireeva M. B. Transformation of the Spring High-water and Flood Runoff in the Upper Volga Basin under the Climate Change Impact. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2021; (4): (6—28). (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2021-4-1.
5. Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. *Gidrometeorologija i jekologija = Hydro-meteorology and Ecology*. 2023; (70): (7—37). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-2023-70-7-37.
6. Lobanov V. A., Toshchakova G. G. Features and causes of modern climate change in Russia. *Geograficheskiy vestnik. = Geographic Bulletin*. 2016; (38): (80—89). (In Russ.). doi: 10.17072/2079-7877-2016-3-79-89.
7. Lavrov S. A., Kalyuzhnyi I. L. Physical Processes and Regularities Concerning the Volga River Basin Rivers Winter and Spring Runoff Formation in the Conditions of Climate Change. *Vodnoe hozjajstvo Rossii = Water Sector of Russia*. 2012; (4): (74—84). (In Russ.).
8. Kalyuzhnyi I. L., Lavrov S. A. Variability of frost depth in the Volga River basin and its impact on the winter and spring runoff formation process under climate change. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2016; (7): (58—71). (In Russ.).
9. Lavrov S. A., Kalyuzhnyi I. L. Climatic Changes Impact upon the Spring High-water Runoff and its Formation Factors in the Volga Basin. *Vodnoe hozjajstvo Rossii = Water Sector of Russia*. 2016; (6): (42—60). (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2016-6-4
10. Churagulov R. S., Churagulova Z. S. Water-physical properties of gray mining soils of the valleys of the Southern Urals in connection with the hydrological role of mountain forests. *Povyshenie plodorodija pochv v usloviyah intensivnoj sistemy zemledelija = Increasing soil fertility in an intensive farming system*. 1986; (152—159). (In Russ.).
11. Zhuravin A. S., Gurevich E. V., Markov M. L. Transition period in the restructuring of the watershed moisture circulation system (according to the Kamennaya Steppe water balance station). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2024; (1): (17—27). (In Russ.).
12. Zhuravin S. A. *Issledovanie processov vlogooborota na vodnobilansovyh stancijah v Rossii = Study of water at the water balance stations in Russia*. St. Petersburg: RIAL ltd, 2022: 224 p.

### **Информация об авторах**

Валерий Иванович Барышев, аспирант Государственного гидрологического института, hfl@mail.ru.

Игорь Леонидович Калюжный, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, зав. Лабораторией гидрофизики ФГБУ «Государственный гидрологический институт», hfl@mail.ru.

### **Information about authors**

Valerii I. Baryshev, graduate student of the State Hydrological Institute.

Igor L. Kalyuzhny, PhD (Tech. Sci.), senior research scientist, Chief of Hydrophysical Department. State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.09.2023

Принята к печати после доработки 12.02.2024

The article was received on 22.09.2023

The article was accepted after revision on 12.02.2024



Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 87—104.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):87—104.

Научная статья

УДК 556.545(282.247.29)«323»

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104

## **Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения**

*Надежда Вадимовна Двоеглазова<sup>1, 2</sup>,  
Борис Валентинович Чубаренко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия,  
nadya2eyes@mail.ru

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

*Аннотация.* С помощью натуральных наблюдений (съёмки по длине русла и ежедневные вертикальные зондирования в одной точке) проведена оценка динамики и дальности проникновения вверх по руслу затоков солоноватых вод в устьевой участок реки Преголи в осенний период 2022 г. Максимальная дальность проникновения верхней границы устьевой зоны смешения в 2022 г. составила более 17 км, что превышает дальности, оценённые ранее по данным 90-х годов прошлого века. Выявленное усиление эффекта проникновения солоноватых вод вверх по руслу может усугубиться при существующей тенденции изменений местных климатических условий. Сохраняется угроза блокирования водозаборов г. Калининграда интрузиями вод с повышенной солёностью. Необходимо продление сети мониторинговых станций вверх по руслу реки.

*Ключевые слова:* интрузии солоноватых вод, гидрологические свойства, эстуарии, STD-зондирование, река Преголя, Калининградский залив.

*Благодарности.* Сбор и интерпретация натуральных данных выполнялись за счет госзадания ИО РАН (темы № FMWE-2021-0012 и № FMWE-2024-0025). Авторы выражают благодарность сотрудникам Калининградского управления Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт», оказавшим содействие при проведении экспедиционных работ, сотрудникам ГП КО «Водоканал» и Калининградского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, оказавшим поддержку на этапе сбора натуральных данных, а также н.с. АО ИО РАН, канд. геогр. наук А. В. Килесо за помощь в проведении инструментальных измерений.

*Для цитирования:* Двоеглазова Н. В., Чубаренко Б. В. Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. 87—104. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104.

## Changes in the structure of the hydrological characteristics of the estuary mixing zone of the Pregolya River (South-East Baltic) during saline water inflow period in autumn

Nadezhda V. Dvoeglazova<sup>1, 2</sup>, Boris V. Chubarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, nadya2eyes@mail.ru

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

*Summary.* Using field observations (vertical CTD soundings of the water column), we assessed the dynamics and depth of penetration upstream of brackish water inflows into the estuary section of the Pregolya River in the autumn period of 2022. The initial data were obtained as a result of surveys along the river throughout the entire estuary mixing zone of the Pregolya River (October 11 and 27, November 14 and 29, 2022), and as a result of daily vertical profiling in the center of the Pregolya estuary zone during two months (from October 21 to December 2, 2022). Spatial measurements made it possible to obtain information about the structure of the estuarine mixing zone: (a) when the penetration of brackish water is traced in the entire water column from the surface to the bottom, and (b) when the interaction of brackish water with fresh water occurs only in the lower bottom layers. The maximum penetration range of the upper boundary of the estuarine mixing zone in 2022 was more than 17 km, which exceeds the ranges previously estimated based on the data of the 1990s. The revealed increase of the effect of brackish water penetration upstream can be explained by the existing trend of changes in local climatic conditions. It was possible to fix the protracted effect of the inflow of brackish waters, which creates a threat of blocking the water intakes of the Kaliningrad City by intrusions of brackish waters. With the existing trend in local climatic conditions changes, including an increase in the number of storms and a decrease in precipitation, brackish water inflows into the estuary section of the Pregolya River may cause interruptions in the water supply to the Kaliningrad City. To study the dynamics of the salinity wedge and its response to changes in hydrometeorological conditions, it is necessary to extend the network of monitoring stations upstream the river.

*Keywords:* brackish water intrusions, hydrological properties, estuary, CTD-probing, Pregolya River, Vistula Lagoon.

*Acknowledgments.* The collection and interpretation of field data were carried out at the expense of the state task of the IO RAS (the themes № FMWE-2021-0012 and № FMWE-2024-0025). The authors are grateful to the employees of the Kaliningrad Department of the «Rosmorport» North-Western Basin Branch for assistance during the field work and to employees of the municipal water supply enterprise «Vodokanal» and Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for the support in data collection, and Alexander Kileso (PhD, researcher of AO IO RAS) for the help with instrumental measurements.

*For citation:* Dvoeglazova N.V., Chubarenko B. V. Changes in the structure of the hydrological characteristics of the estuary mixing zone of the Pregolya River (South-East Baltic) during saline water inflow period in autumn. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):87—104. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104.

### Введение

При описании эстуарных зон, располагающихся в пределах устьевых участков рек, т. е. зон смешения пресных речных вод с солоноватыми водами приёмного водоёма, выделяются фронтальный раздел, верхняя (речная) и нижняя (морская) граница эстуарной зоны [1]. Примеры [2, 3] изучения затоков солоноватых вод в реки из слабосолёных непривливаемых приёмных водоёмов, таких как Азовское, Белое, Балтийское моря (солёность в пределах 4,5 — 11 ‰), показывают, что

максимальные дальности проникновения составляют до 10 км (р. Кубань), 28 км (р. Западная Двина), 45 км (р. Лиелупе).

Для устьевоего участка реки Преголи (рис. 1) характерны затоки солоноватых вод из Калининградского залива<sup>1</sup> [4]. Согласно проведённым ранее (до 2001 г. и в 2013 г.) исследованиям [5, 6], самые сильные затоки солоноватых вод в реку Преголю происходят в осенний сезон. По данным этих натурных наблюдений максимальная дальность проникновения солоноватых вод вверх по руслу Преголи составляла 17 км от устья (по положению изогалины 1 ‰ в придонном слое) [5]. Согласно модельным расчётам [6], солоноватые воды могут проникать вверх по руслу на расстояние до 20 км от устья, перемещаясь вверх по реке в условиях сильного нагонного ветра, подъёма уровня воды и уменьшения речного стока.

Кроме того, что солоноватые воды оказывают влияние на биологические сообщества [7], проникновение солоноватых вод на максимальные расстояния вглубь реки может нарушать функционирование системы водоснабжения г. Калининграда. В осенний период активных нагонов солоноватые воды проникают на 17 км от устья вплоть до водозабора Южной водопроводной станции (ЮВС-2), делая невозможным забор воды из реки [5]. От продолжительности таких периодов зависит, способны ли резервные водохранилища обеспечить водоснабжение без перебоев.

Исходная информация о гидрологии устьевоего участка р. Преголи в осенний период была получена [5, 8] довольно давно. Её обобщение [9] не учитывало климатического тренда в характеристиках уровня воды (рост среднего уровня на 4,6 см за десятилетие в среднем за период с 1961 г. по 2018 г., с увеличением до 8,4 см за десятилетие в период с 1991 г. по 2005 г.), долговременные изменения ветрового воздействия и атмосферных осадков [10, 11, 12]. Для современной оценки интенсивности и дальности проникновения затоков солоноватых вод в р. Преголю необходимо получение новых данных и сравнение их с результатами более ранних измерений. К тому же, все ранее полученные данные для устьевой зоны смешения собирались методом выполнения пространственных разрезов с месячным шагом, совместный анализ данных о вертикальном распределении гидрологических характеристик по пространству и по времени не проводился.

Целью работы является оценка динамики гидрологических характеристик (солёность и температура с учётом временной изменчивости вертикальной и горизонтальной стратификации) на устьевом участке реки Преголи во время сезона активных нагонных явлений (осень) и сравнение результатов с предшествующими исследованиями.

Для достижения цели осенью 2022 г. были проведены детальные гидрологические съёмки по пространству и ежедневные зондирования в характерной точке

---

<sup>1</sup> Приёмным водоёмом для рукава Нижней Преголи является Калининградский-Вислинский залив, который по гидро-морфологической типизации является типичной эстуарной лагуной и в англоязычной литературе имеет название Vistula Lagoon [13]. Название «Калининградский-Вислинский залив» [14] используется для обозначения всей акватории, тогда как северная, принадлежащая России ее часть (56,2 % акватории), называется Калининградским заливом, южная (польская) часть — Вислинским заливом.

в зоне смешения вод реки Преголи с солоноватыми водами Калининградского залива, определены границы проникновения солоноватых вод и выполнен анализ гидрологической структуры вод с учётом гидрометеорологических факторов и в сравнении с ранее полученными результатами.

### Объект исследования

Устьевая область р. Преголи относится к эстуарному типу с бесприливным устьем и полузакрытым устьевым взморьем [1, 15, 16]. Два устьевых рукава реки Преголи впадают в разные заливы — рукав Нижняя Преголя — в Калининградский залив, а рукав Дейма — в Куршский залив [4, 14]. Распределение стока по рукавам непостоянно. По данным различных публикаций, относящихся к разным периодам осреднения, среднегодовая пропорция изменяется в пределах 54—66 % для рукава Нижней Преголи и 34—46 % для рукава Деймы [14]. В данной статье, следуя реестру географических названий Калининградской области<sup>1</sup> и традиционным представлениям на картах, мы будем называть рукав Нижняя Преголя рекой Преголей, который и является её продолжением. Также в тексте будет учтено, что в части своего течения он разделяется на протоки Новая и Старая Преголя (рис. 1 б, в).

Устьевой створ для реки Преголи находится в точке её впадения в Калининградский залив (рис. 1 в, ст. 22). В работе он используется как начало отсчета дальности проникновения затока солоноватых вод вглубь реки. Устьевое взморье (преобладание морского гидрологического режима) — Калининградский залив и Калининградский морской канал — это вся акватория от устья Преголи до Балтийского пролива<sup>2</sup>. Устьевой участок расположен выше по течению реки: от устья до места впадения реки Лавы [4].

Устьевая зона смешения, согласно [1], представляет собой участок реки, в котором происходит процесс трансформации речной воды в морскую (заливную). Границы устьевой зоны смешения р. Преголи перемещаются ниже или выше по течению реки Преголи и Калининградского морского канала в зависимости от сезона и гидрометеорологических характеристик [9]. Усиление повторяемости и скорости западных ветров, подъём уровня воды и уменьшение речного стока, действуя в совокупности, создают условия для движения солоноватых вод зоны смешения вверх по реке [5].

В устье р. Преголи находится административный центр — город Калининград, поэтому изучение изменчивости гидрологического режима имеет важное практическое значение. Проникновение солоноватых вод Калининградского залива вверх по реке Преголе создают проблемы для функционирования системы водоснабжения города Калининграда. Ранее водозабор городской системы водоснабжения

<sup>1</sup> <https://cgkipd.ru/upload/iblock/51f/1jdbeaudocdwmmlmgqqypp7aaahhqyp.pdf>

<sup>2</sup> Протока между Калининградским заливом и Балтийским морем в районе г. Балтийска не имеет отдельного официального географического названия (отсутствует в реестре географических названий Калининградской области, URL: <https://cgkipd.ru/upload/iblock/51f/1jdbeaudocdwmmlmgqqypp7aaahhqyp.pdf>). В научной литературе, начиная с классической публикации [17], она обозначается как Балтийский пролив (находится рядом с г. Балтийском).

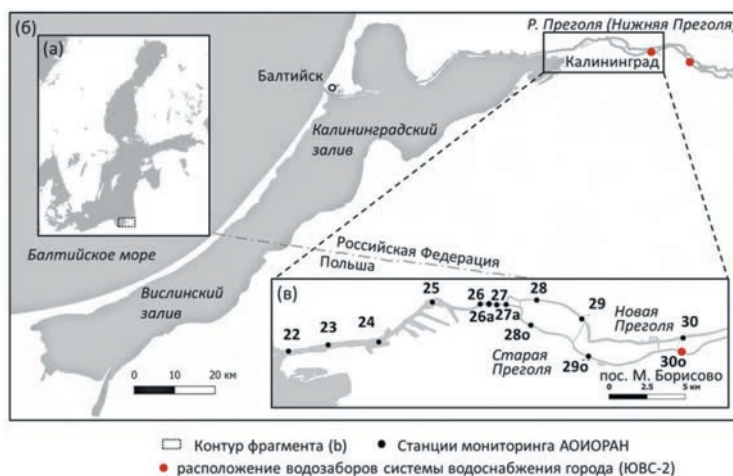


Рис. 1. Расположение объекта исследования в юго-восточной части Балтийского моря (а): приёмный водоём — Калининградский/Вислинский залив (б); схема станций мониторинга АОИОРАН в пределах устьевой зоны смешения от устья Преголи (ст. 22) до ЮВС-2 (ст. 30/30о) через протоки Новая Преголя и Старая Преголя (в).

Fig. 1 Location of the research object in the south-eastern part of the Baltic Sea (a), the Kaliningrad / Vistula Lagoon (b) is the terminal basinscheme of AO IO RAS monitoring stations within the estuarine mixing zone from the mouth of the Pregolya River (st. 22) to water supply facilities (station 30/30o) through the watercourses of New Pregolya and Old Pregolya (c).

располагался в пос. Малое Борисово (ГП КО «Водоканал»)<sup>1</sup> в 17 км от устья, а с 2008 г. он был перенесён выше по течению. Влияние нагонов солоноватой воды после этого уменьшилось, но связанные с этим перебои в водоснабжении полностью не прекратились.

Пригодной для забора считается вода с низкой хлорностью. Если зафиксировано превышение ПДК (350 мг/л, что почти равно 1 ‰ согласно пересчёту для распреснённых районов Каспийского моря [1]) (СанПиН 1.2.3685-21, 2021; ГОСТ 27065-86, 1988) исходной (забираемой) воды, водозабор из реки Преголи прекращается. Система водоснабжения переходит на потребление воды из двух водохранилищ общим объёмом порядка 3 млн м<sup>3</sup> (ГП КО «Водоканал»). Этот резервный источник способен обеспечивать работу системы водоснабжения (60 % потребности города Калининграда) в течение 10—20 суток.

### Материалы и методы исследования

При выборе периода для натуральных наблюдений решающим фактором стало характерное для осеннего сезона влияние нагонных явлений, способствующее наиболее активному проникновению солоноватых вод вверх по реке [5].

<sup>1</sup> Государственное предприятие Калининградской области «Водоканал» (ГП КО «Водоканал») [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vk39.ru/o-vodokanale/vodosnabzhenie/> (Последнее обращение 24.12.2022).

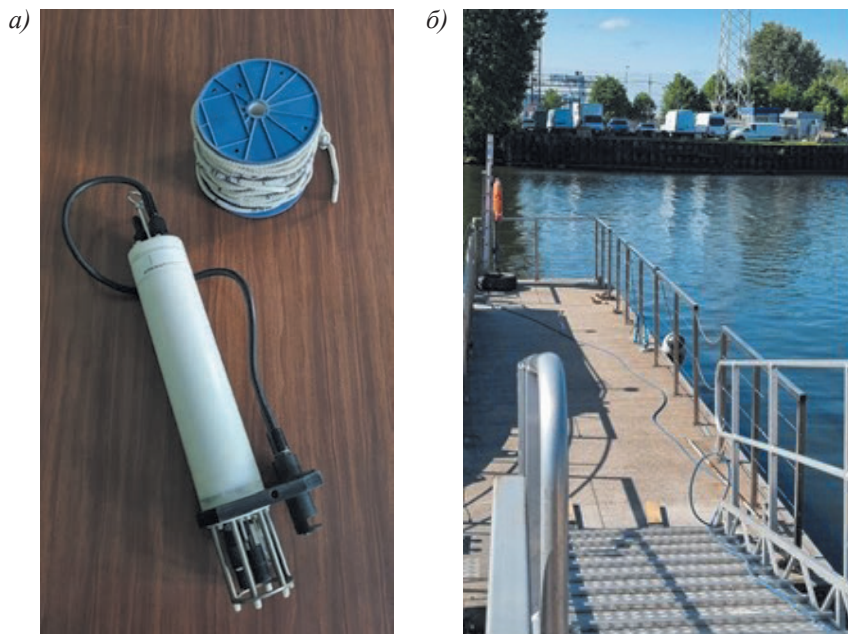


Рис. 2. Прибор Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe, которым выполнялись измерения (а); место проведения измерений (ст. 26а, причал ФГУП «Росморпорт») (б).

Fig. 2. The Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe (a) used to measure; (b) place of measurements (st. 26a, mooring of FSUE «Rosmorport»).

В период с 11 октября по 2 декабря 2022 г. инструментальные наблюдения (вертикальные зондирования гидрологическим зондом Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe, рис. 2 а) проводились в устьевой области р. Преголи в рамках двух подходов. Первый — зондирования по сети мониторинговых станций АО ИО РАН (рис. 1) с периодичностью один раз в две недели (4 обследования: 11 и 27 октября, 14 и 29 ноября 2022 г.). Протяженность участка проведения работ — 52 км (от молов в г. Балтийске до водозабора ЮВС-2 в г. Калининграде, количество станций — 27 шт.). Работы выполнялись с борта маломерного плавсредства после полной остановки.

Второй подход — ежедневные зондирования в одной контрольной точке (рис. 1 в, ст. 26а), расположенной в центральной части устьевой зоны смешения (причал ФГУП «Росморпорт» в 8 км от устья, выступающий в сторону фарватера до глубины 7 м, рис. 2 б). Период работ — с 21 октября по 2 декабря 2022 г. в интервале с 8:00 до 10:00 местного времени.

Гидрологические измерения были дополнены данными по изменению уровня воды в г. Калининграде (гидропост Калининград–Рыбный порт) и о ходе ветра и осадков в г. Балтийске в период с 1 октября по 23 декабря 2022 г.



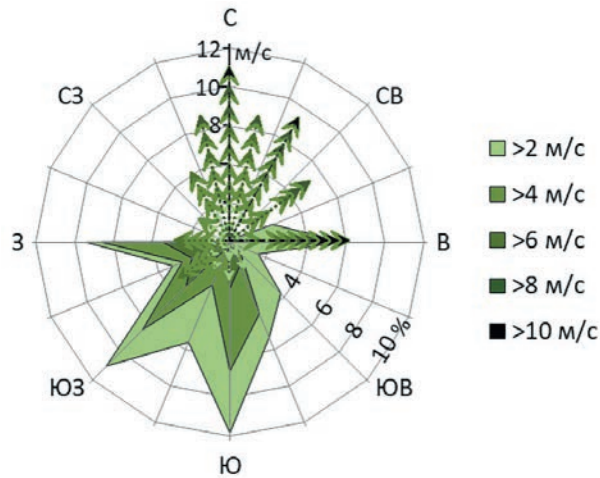


Рис. 3. Преобладающие направления ветра (по данным метеостанции Балтийск, суточное осреднение) за период с 21 октября по 2 декабря 2022 г. Информация представлена в комбинированном виде — роза ветров по градациям скорости и векторы ветра, иллюстрирующие величину и направление скорости ветра.

Fig. 3. The prevailing wind directions (according to the Baltiysk meteorological station, daily average) for the period from October 21 to December 2, 2022. The information is presented in a combined form — a wind rose showing the direction which the wind blew ‘from’ and speed gradations, and vectors, illustrating the magnitude and direction of wind speed.

В период измерений господствовали ветра юго-западных румбов (рис. 3) с максимальными скоростями до 11—15 м/с. Во время первых трёх обследований (11 и 27 октября, 14 ноября 2022 г.) преобладали юго-западные ветра (рис. 4 а), за период было отмечено 6 случаев повышения скорости ветра (порывы до 10—16 м/с). После 16 ноября 2022 г. господствующее направление ветра изменилось, преобладали южные — юго-восточные ветра, имелся эпизод повышения скорости ветра с порывами выше 9 м/с, но непосредственно перед последним обследованием (29 ноября 2022 г.) ветер был слабый (средняя скорость падала до величин менее 1 м/с, а порывы — менее 4 м/с).

Водный режим во время проведения измерений можно разделить на три периода. Первые три обследования пришлось на период с 1 октября по 15 ноября 2022 г.), когда среднесуточный уровень воды изменялся, повторяя проявления ветровой активности, в пределах 34 см (рис. 4 б) с аномалиями от –17 до 17 см относительно среднего значения за период. Четвёртое обследование пришлось на окончание второго периода с 16 ноября по 6 декабря 2022 г., характеризующегося монотонным падением уровня на 30 см. Самые сильные скачки уровня пришлось на период с 7 декабря по 22 декабря 2022 г. и были вызваны сильной штормовой активностью (до 15 м/с).

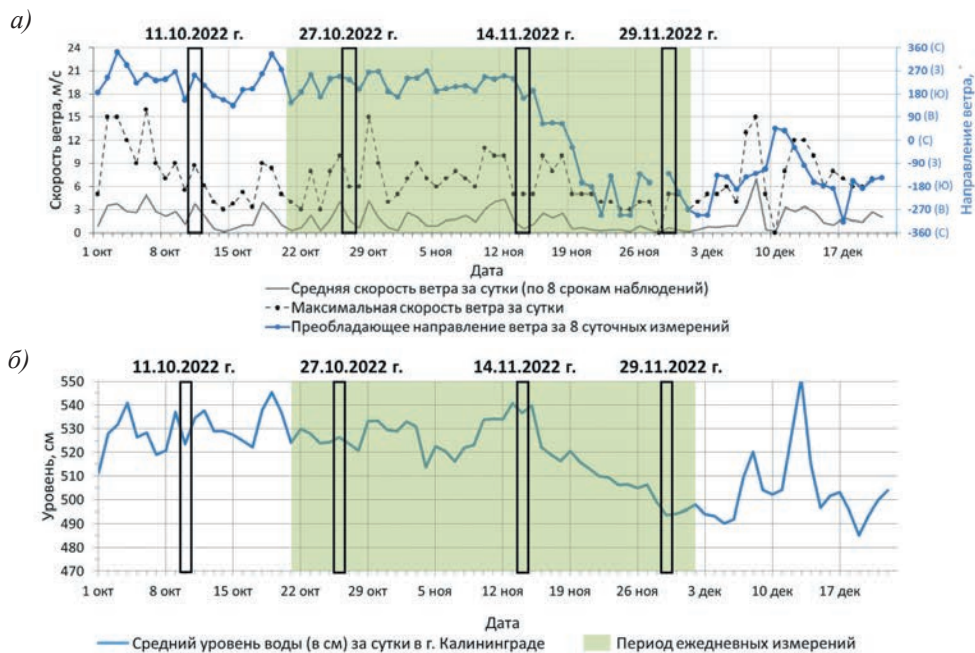


Рис. 4 Характеристики ветра в г. Калининграде по данным [18] за период с 1 октября по 22 декабря 2022 г. (а) и уровень воды (условная шкала) по данным гидропоста Калининград – Рыбный порт (Росгидромет) за период с 1 октября по 22 декабря 2022 г. (б).

Fig. 4. Wind characteristics in Kaliningrad according [18] to for the period from October 1 to December 22, 2022 (a) and water level (conditional scale) according to the Kaliningrad Sea Fishing Port gauging station (ROSHYDROMET) for the period from October 1 to December 22, 2022 (b).

### Структура зоны смешения

В пределах устьевой зоны смешения р. Преголи (рис. 5), выделяются (по [1]) три подзоны (перечислены в направлении от приёмного водоёма вверх по руслу) со следующими характеристиками:

— в подзоне опреснения пограничные значения солёности должны достигать 90 % средней солёности приёмного водоёма, что по условиям для Калининградского залива [13] даёт граничную солёность 3,6 ‰;

— во фронтальной подзоне горизонтальные и вертикальные градиенты достигают максимальных значений на фронтальном разделе, положение которого меняется во времени;

— пресноводная подзона с солёностью менее 1 ‰ (для реки Преголи, как правило, это фоновая солёность со значениями 0,26 — 0,3 ‰).

Привязка расположения подзон к отдельным участкам акватории (рис. 5) выполнена по результатам анализа данных мониторинга за несколько лет (для осени) [9].

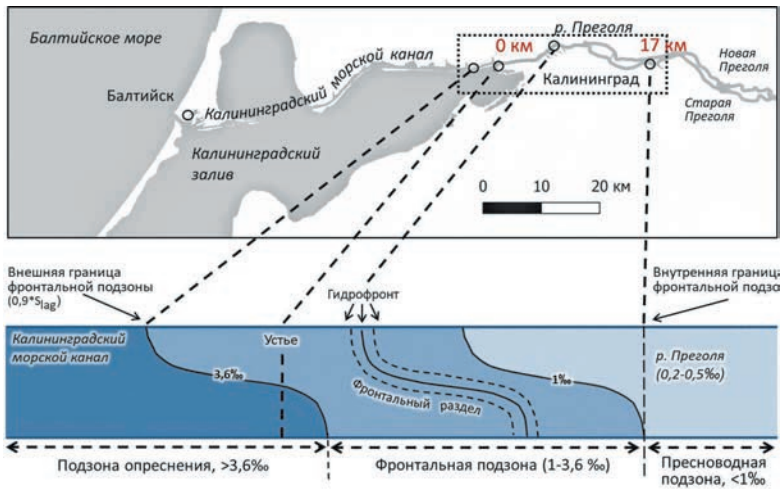


Рис. 5. Схема зонирования (согласно [1]) устьевой зоны смешения в р. Преголе: в порядке от приёмного водоёма вверх по руслу — подзона опреснения (тёмно-синий), фронтальная подзона (синий), пресноводная подзона (голубой). Среднемноголетняя ситуация [9] для осеннего периода.

Fig. 5. Zoning scheme (according to [1]) of estuary mixing zone in the Pregolya River: in sequence from the terminal basin upstream — desalination subzone (dark blue), frontal subzone (blue), freshwater subzone (light blue). The long-term average situation [9] for the autumn period.

Зона смешения (1—4 ‰) сезонно мигрирует на 10—20 км как вверх, так и вниз по течению, а также укорачивается или удлиняется. Зимой и очень ранней весной зона смешения сокращается до 3—5 км в длину и локализуется в районе гаваней порта Калининград (7—10 км выше устья). В это время характерные значения вертикального и горизонтального градиентов солёности составляют 0,3—0,35 ‰ на м и км соответственно. Весеннее усиление речного стока Преголи растягивает зону смешения на длину до 10—25 км вдоль канала и отодвигает её центр в сторону Балтийска так, что он располагается на 10—20 км от устья в сторону моря, а горизонтальный и вертикальный градиенты солёности спадают до 0,05—0,15 ‰ на м и км соответственно. В начале лета речной сток значительно уменьшается, и любое повышение уровня воды на границе море-залив немедленно индуцирует очередную подвижку придонной интрузии морской воды вдоль Калининградского морского канала в сторону устья Преголи. В результате вода солёностью 4,5—5 ‰ достигает устья реки Преголи к осени, но верхний слой воды остается преимущественно пресным. Вертикальные градиенты достигают максимума (до 0,5 ‰ на м).

В интересующий нас осенний период внешняя (морская) граница устьевой зоны смешения обычно находится в Калининградском морском канале, а внутренняя (речная) — выше по течению в реке Преголе вплоть до 17 км выше устья (рис. 5); положение обеих границ непостоянно (вариации в пределах 2—5 км), а зависит от предыстории гидрометеорологических характеристик [9, 13].

Форма фронтального раздела меняется в зависимости от активности перемешивания [19]. Он может представлять собой полосу сгущения изогалин вертикальной ориентации, справа и слева от которой солёность однородна от поверхности до дна; либо форму ярко выраженного солёностного клина с максимумом вертикального градиента солёности в промежуточных слоях (рис. 6 б, г) и слоем опресненных вод у поверхности (что соответствует солёностной придонной интрузии, когда реализуется фактически 2-слойный режим); либо смешанные варианты, как, например, на рис. 6 а и на рис. 6 в, когда в верхних слоях реализуется хорошее вертикальное перемешивание, изогалины почти вертикальны, а в придонных слоях имеется солёностная интрузия.

### **Пространственная (вертикальная и горизонтальная) изменчивость гидрологических характеристик**

По результатам натуральных наблюдений в осенний период 2022 г. (рис. 6) удалось зафиксировать глубокое вторжение зоны смешения в устьевой участок реки Преголи, а также выявить структуру этой зоны, иллюстрирующую различную степень смешения речных вод с солоноватыми водами залива.

Самое глубокое вторжение было зафиксировано 29 ноября, верхняя граница зоны смешения находилась гораздо выше последней станции (ст. 30о, находящейся в 17 км от устья), так как значения солёности в придонном слое на этой станции достигли 4,1 ‰, а нижняя граница была локализована существенно выше устья.

По вертикальным разрезам (рис. 6) видно, что изогалиния 3,6 ‰ выклинивается на поверхность в районе станций 22—24. Согласно параметру стратификации  $n^1$  [3, 19, 20], рассчитанному по данным на станциях 25—30о, получено, что 11 октября (рис. 6 а,  $n = 0,4—0,7$ ) и 14 ноября (рис. 6 в,  $n = 0,4—1,2$ ) распределение солёности на станциях 25—30о соответствует второму типу проникновения [3] или смешения [20] солоноватых вод, который характеризуется частичным (умеренным) вертикальным перемешиванием и умеренным характером стратификации [3, 20]. Для дат 27 октября (рис. 6 б,  $n = 1,2—1,6$ ) и 29 ноября (рис. 6 г,  $n = 1,2—2$ ) параметр стратификации соответствует третьему типу проникновения солоноватых вод, который характеризуется слабым вертикальным перемешиванием и сильной стратификацией с наличием клина солоноватых вод.

Вертикальные градиенты солёности 27 октября и 29 ноября 2022 г. заметно более резкие, а 11 октября и 14 ноября 2022 г. — размытые. Наибольшие вертикальные градиенты, измеренные 27 октября и 29 ноября, были локализованы на глубинах 4 и 3,4 м и были равны 21,5 и 17,4 ‰/м соответственно. Величины градиентов 11 октября и 14 ноября были несколько меньше, они были локализованы на глубинах 3,2 и 3 м составили 1,2 и 8,9 ‰/м соответственно.

Горизонтальный градиент изменения придонной солёности от ст. 25 до ст. 30о был больше, чем подповерхностной и составил 0,3 ‰/км 11 октября и 27 октября,

<sup>1</sup> Применение параметра стратификации в случае, когда в верхних слоях находится пресная вода, приводит к нефизичному результату, когда от солёности придонного горизонта ничего не зависит, и при любой, даже самой маленькой солёности у дна, параметр стратификации равен 2.

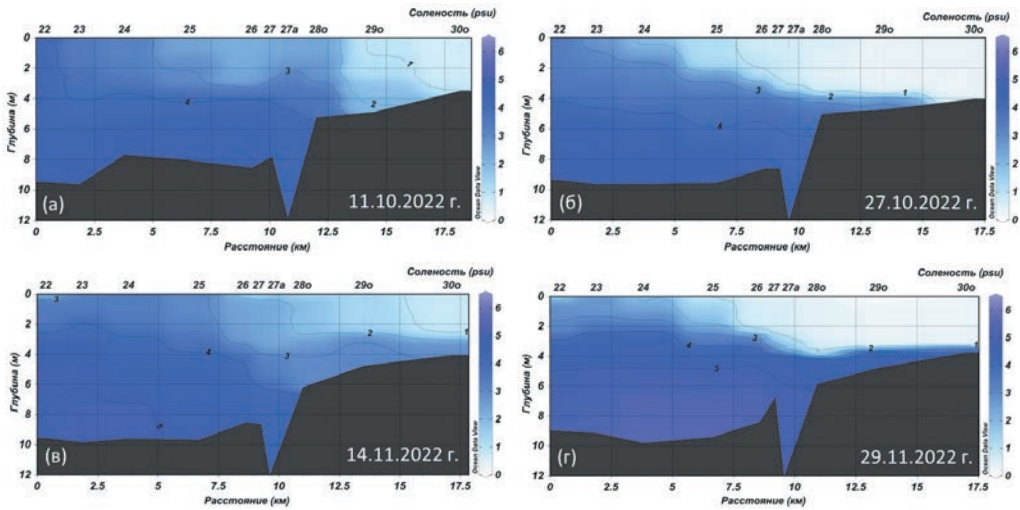


Рис. 6. Вертикальные разрезы в поле солёности для устьевой зоны смешения от устья рукава Нижней Преголи (ст. 22) до станции 30о (по протоке Старой Преголи) 11 октября (а), 27 октября (б), 14 ноября (в) и 29 ноября (г) 2022 г.

Fig. 6. Vertical sections in the salinity field for the estuary mixing zone from the mouth of the Downstream Pregolya branch (station 22) to the station 30o (along the Old Pregolya watercourse) on October 11 (a), October 27 (b), November 14 (c) and November 29 (d) 2022.

а 14 ноября и 29 ноября несколько меньше, 0,2 и 0,1 ‰/км соответственно. Горизонтальный градиент изменения солёности в подповерхностном слое составил 0,2 ‰/км 11 октября и 14 ноября, 0,1 ‰/км — 27 октября и 29 ноября.

### Временная изменчивость вертикальной структуры гидрологических характеристик в районе расположения фронтального раздела

В придонных слоях контрольной точки ежедневного мониторинга (рис. 1, ст. 26а) в течение всего периода проведения измерений присутствовала вода (рис. 7 а) с солёностью > 1 ‰ (максимальные значения достигали 5,5 ‰). Следовательно, вертикальная структура всегда была неоднородна и присутствовала вертикальная стратификация водной толщи по солёности и плотности.

В течение периода с 21 октября по 20 ноября 2022 г. наблюдалась частая смена режима осолонения исследуемого участка. Наблюдалось и почти полное опреснение (солёность < 1 ‰) верхних слоёв до глубин 2—3,5 м, и обратная ситуация — осолонение почти всей водной толщи (солёность достигала 3 ‰ в поверхностном слое). После 20 ноября 2022 г. почти неизменно сохранялась двухслойная структура: фактически пресная вода (< 1 ‰) в слоях до 2 м и солоноватые воды (солёность 4—5,5 ‰) в придонных слоях (глубже 3 м) с зоной повышенных вертикальных градиентов солёности (5 ‰/м) между ними.



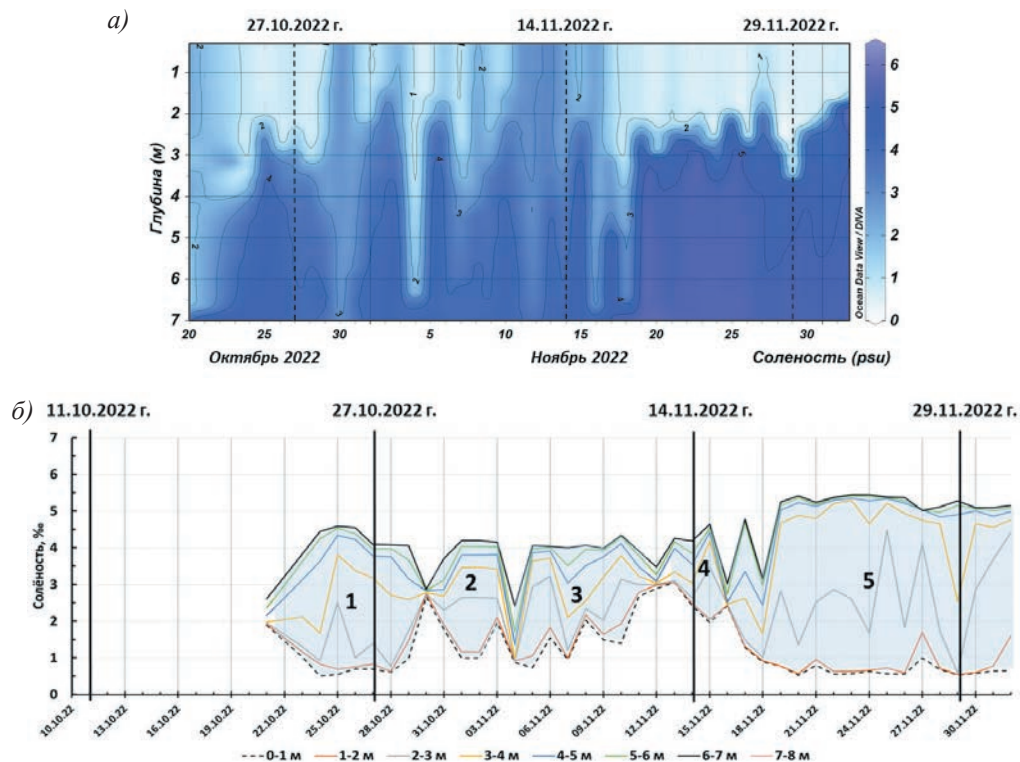


Рис. 7. Временная изменчивость структуры солёности (а) и средней солёности на обособленных горизонтах (б) на ст. 26а в период с 21 октября по 2 декабря 2022 г. (периоды сильной стратификации обозначены цифрами 1—5).

Fig. 7. Temporal variability of the structure of salinity (a) and average salinity at isolated horizons (b) in point 26a in the period from October 21 to December 2, 2022 (periods of strong stratification are indicated by numbers 1—5).

Смена режимов осолонения хорошо иллюстрируется диаграммой на рис. 7 б, на которой представлен временной ход значений солёности для слоёв 1 м толщиной. Закрашенная область соответствует условиям стратификации: чем она шире, тем больше разница по солёности между верхним и придонным слоями. Периоды сильной стратификации разделяются краткосрочными моментами возникновения хорошего вертикального перемешивания, которые отражаются на диаграмме в виде сужений закрашенной области.

Из диаграммы видно, что выделяются пять периодов (см. рис. 7 б) с сильно стратифицированной по солёности водной толщей: 21—30 октября, 30 октября—3 ноября, 4—12 ноября, 13—16 ноября и 16 ноября—2 декабря 2022 г. Для них характерно резкое повышение солёности на глубинах 4—5 м, соответствующих ядру солёностного клина.



## Обсуждение результатов

По данным пространственных измерений удалось выявить наличие двух характерных структур (рис. 8) распределения солёности: первая — с размытой, и вторая — с чёткой фронтальной границей между солоноватыми и пресными речными водами.

Ситуация с более слабой вертикальной стратификацией водной толщи, а значит, и с более размытой границей между пресными и солоноватыми водами, наблюдалась 11 октября и 14 ноября 2022 г. (рис. 8 а). Измерениям в эти дни предшествовал ветер западных и юго-западных румбов. Ветер западных румбов (порывы до 9 м/с) 11 октября 2022 г. вовлек водную толщу в процесс перемешивания, уменьшив вертикальные градиенты. Для 14 ноября 2022 г. условия были схожи (ветер был на 2 дня раньше, а в день проведения измерений наблюдался слабый ветер юго-восточных румбов).

Ситуация, зафиксированная 27 октября и 29 ноября 2022 г. (рис. 8 б), иллюстрирует случай пологого солёностного клина (с резко очерченной фронтальной границей между солоноватыми и пресными водами), обеспечивающего проникновение солоноватых вод глубоко вверх по реке. Установившийся и продолжающийся в течение недели (с 20 по 29 ноября 2022 г.) восточный—юго-восточный ветер (рис. 5 б), усилив сток реки, спровоцировал придонный «интрузионный противозаток», движущийся вверх по течению реки (влияние эжекторного эффекта на нижние слои воды) [5]. На уровне же верхних трех метров солёность (0,3 ‰) на момент измерений соответствовала значениям пресной речной воды. Воздействия ветра со скоростью менее 3 м/с (20—29 ноября 2022 г.) не хватило для перемешивания всей толщи и вовлечения придонного слоя. Кроме того, ослабление действия ветра (в течение 10 дней с 19 ноября после продолжительных нагонов) обеспечило активизацию стока реки и оттеснение границы фронтальной подзоны вниз по реке в верхних слоях.

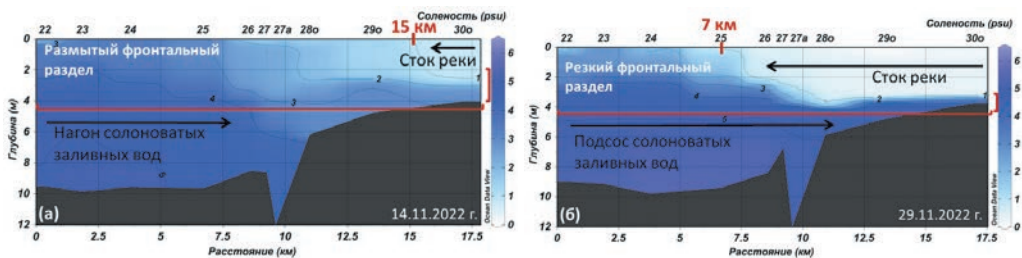


Рис. 8. Схемы двух структур на примере вертикальных разрезов в поле солёности для устьевой зоны смешения от устья рукава Нижней Преголи (ст. 22) до ст. 300 (по протоке Старой Преголи) 14 ноября (а) и 29 ноября (б) 2022 г.

Fig. 8. Schemes of two structures in the salinity field for the estuary mixing zone from the mouth of the Downstream Pregolya branch (st. 22) to the station 300 (along the Old Pregolya branch) on November 14 (a) and November 29 (b), 2022.

Продолжительность периода затора, размер и структура которого зафиксированы пространственными измерениями 29 ноября 2022 г., составила 15 дней с 18 ноября по 02 декабря 2022 г. В этот период на станции 26а значения солоноватой воды наблюдались в среднем глубже двух метров (рис. 7 а), что не влияет на забор питьевой воды.

Предположительно такая структура сохранялась ещё в течение 5—10 дней до 7—12 декабря 2022 г., после чего из-за усиления западных ветров и подъёма уровня воды (рис. 4 а, б) стратификация должна была приобрести менее выраженный характер. Это привело бы к однородной вертикальной структуре водной толщи по солёности и повышению солёности поверхностных слоёв до среднего значения на станции — 0,66 ‰, что близко к ПДК (СанПиН 1.2.3686-21, 2021; ГОСТ 27065-86, 1988), следовательно, водозабор из реки осуществлять нельзя. Факт перекрытия водозабора 12.12.2022 г. (ГП КО «Водоканал») подтверждает это предположение, а информация о длительности перекрытия даёт оценку продолжительности затора — 9 суток.

Временная изменчивость вертикального распределения солёности (рис. 7 а) и средней солёности для однометровых слоёв (рис. 7 б) в середине устьевой зоны смещения реки Преголи говорит о частой кратковременной смене режима осолонения исследуемого участка с чередованием однородного и стратифицированного распределения солёности по вертикали.

Все обследования по системе станций мониторинга относятся к периодам стратифицированной вертикальной структуры солёности продолжительностью от 4 до 16 дней (отмечены цифрами 1—5 на рис. 7 б). На даты 27 октября и 29 ноября пришлось более сильная стратификация, так как разница значений солёности между придонным и поверхностным горизонтами (периоды 1 и 5 на рис. 7 б) составляла порядка 3,5—4,5 ‰, а на 14 ноября — более слабая (период 4 на рис. 7 б), размах составил около 2 ‰. Разница между более сильной и более слабой стратификацией в 2,5 ‰ прослеживается и на структуре вертикальных разрезов в поле солёности (рис. 8 а, б).

Периоды однородной вертикальной структуры соотносятся с действием ветров вдольрусловых направлений с порывами 9—15 м/с: 30 октября, 4 ноября и 12 ноября — западных, а 16 ноября и 18 ноября — восточных. Но структура восстанавливается после перемешивания уже на следующие сутки, и пространственное распределение принимает прежнюю структуру солёностного клина.

Совместный анализ пространственно-временной изменчивости показал, что в целом характер гидрологической структуры всей устьевой зоны смещения хорошо прослеживается в данных, полученных на одной контрольной точке.

По данным пространственных измерений по сети станций мониторинга АО ИО РАН [5, 9], известно, что в осенний сезон максимальные значения в устье реки (ст. 22) достигали 4,5—5 ‰, что несколько меньше в сравнении с 5,4 ‰ осенью 2022 г. Ранее также было известно, что солоноватые воды могли доходить до станций 25, 26 и даже до станции 30а в районе ЮВС-2, в то время как сейчас регистрируется наличие более сильного и продолжительного затора. Выделение периодов осолонения устьевой зоны по временному ряду ранее проводилось [5], но без параллельного сравнения с пространственными измерениями.

Бóльшие значения солёности (5,4 ‰) выше устья (ст. 22—27) регистрировались в единоразовом обследовании в ноябре 2015 г. [21], но без охвата всей устьевой зоны смешения (станций выше по реке). В 2019 г. значения 5,6 ‰ [7] для участка от устья до слияния рукавов Старой и Новой Преголи (ст. 22—30о) были получены по данным лишь весенне-летнего сезона (июнь). Эти сведения в совокупности с результатами данной работы свидетельствуют о более глубоком проникновении затока солоноватых вод вверх по руслу в настоящее время по сравнению с условиями на рубеже 2000 годов [5]. Это может быть проявлением влияния изменения местных климатических условий (ослабление стока реки в связи с уменьшением количества осадков). Из этого факта также следует техническая рекомендация о необходимости расширения сети станций вверх по реке.

### Заключение

Благодаря сравнению результатов по двум видам данных (вертикальные зондирования на разрезах вдоль длины русла и ежедневные — в одной точке) была получена более подробная, чем было известно ранее [5, 6, 8, 13, 21], характеристика гидрологической структуры устьевой зоны смешения и описана её мелко-масштабная изменчивость.

Результаты проведенных в 2022 году исследований показали, что верхняя граница зоны смешения заливной и речной вод осенью находится дальше вглубь речного русла, чем было оценено ранее по данным 90 годов XX века [5]. С учётом имеющихся изменений регионального климата [10, 11] это позволяет выдвинуть гипотезу, что в настоящее время солёностный клин в осенний сезон проникает существенно глубже в устьевой участок, что может быть результатом более часто повторяющегося подпора речных вод вследствие воздействия западных ветров и снижения количества атмосферных осадков.

Для фиксации максимального продвижения солёностного клина необходимо расширить сетку мониторинговых станций, продлив её выше по течению реки вплоть до точки разделения реки на два протока — Новую и Старую Преголю.

По данным измерений 2022 г., выделены две структуры, характерные для смешения речных вод с солоноватыми водами залива. Первая, когда проникновение солоноватых вод затрагивает верхние горизонты, воздействуя и на водозабор, вторая, когда интрузия солоноватых вод может проникать гораздо дальше вверх по течению, не взаимодействуя с верхними слоями и не перекрывая устройства для водозабора.

Полученные в ходе работ данные подтверждают присутствие эффекта проникновения солоноватых вод и, возможно, указывают на тенденцию к его усилению. Значит угроза блокирования водозаборов г. Калининграда на реке Преголе интрузиями вод с повышенной солёностью сохраняется и требует построения детальной модели процесса в условиях увеличения воздействия западных ветров [10], так как срок действия затока может превышать срок, на который рассчитан расход воды из резервных источников водоснабжения.

**Список литературы**

1. Михайлов В. Н., Михайлова М. В., Магрицкий Д. В. Основы гидрологии устьев рек // Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет. М.: ООО «Издательство ТРИУМФ». 2018. С. 314. ISBN 978-5-89392-818-1. EDN LWFRFT.
2. Повалишников Е.Д. Причины проникновения морских вод в реки и его экологические последствия // Вестник Московского университета. 2001. 5 (3). С. 20—28. EDN: XSSXGL.
3. Михайлова М. В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 5. С. 483—498. doi: 10.7868/S0321059613050052. EDN QYXJGV.
4. Маркова Л. Л., Нечай И. Я. Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи. // Труды ГОИН. Вып.49. М.: 1960. С.118—157.
5. Чубаренко Б. В., Шкуренко В.И. Физические механизмы проникновения солёных вод вверх по реке Преголе с учётом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2001. № 7. С. 80—88.
6. Домнин Д. А., Соколов А. Н. Особенности и закономерности затока солоноватых масс в лагуно-эстуарной системе Калининградский залив – Преголя – Куршский залив посредством данных контактных измерений и моделирования // Известия КГТУ. 2014. №35. С.11—20.
7. Полунина Ю. Ю., Стонт Ж. И. Влияние ветровых условий на распределение зоопланктона устьевой области реки Преголи (бассейн Балтийского моря) после техногенной трансформации её русла // Морской биологический журнал (Marine Biological Journal). 2022. Т. 7. №1. С. 78—92. doi: 10.21072/mbj.2022.07.1.07. EDN WLTBGF.
8. Домнин Д. А., Пилипчук В. А., Карманов К. В. Формирование затока солоноватых вод в лагуно-эстуарной системе водосборного бассейна Вислинского залива и реки Преголи в результате сгонно-нагонных явлений // Естественные и технические науки. 2013. № 6. С. 206—211. EDN: RRRENN.
9. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). [In] R. Kosyan (ed.) The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World // Switzerland: Springer. 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9\_6.
10. 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. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3.
11. Павловский А. А., Шамшури В. И. Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 681—693. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-681-693.
12. 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.
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // Ecology of Baltic coastal waters. / U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008. P. 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3\_8.
14. 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.
15. Михайлов В. Н., Горин С. Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 3. С. 243. EDN OXXVOT.
16. Симв В. Г., Морозов В. И., Фомина И. Н. Обменные процессы в проливах между эстуариями и морями. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2016. С. 172. ISBN 978-5-9909013-0-8.
17. Гидрометеорологический режим Вислинского залива [Текст] / Под ред. Н. Н. Лазаренко и А. Мавевского; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. гидрометеорол. ин-т Польск. Нар. Республики. Упр. гидрометеорол. службы ЛитССР. Морской филиал ГГМИ в Гдыне. Ленинград: Гидрометеиздат. 1971. С. 279.
18. «Расписание погоды». Лицензированная гидрометеорологическая кампания. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rp5.ru>. Дата обращения: 25.04.2023.
19. Officer Ch.B. Physical Oceanography of Estuaries (and associated coastal waters) // N.Y.: Wiley Intersci. Publ. 1976. P. 465.

20. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. Studies and reports in hydrology // Paris: UNESCO. 1991. V. 50: P. 138. ISBN 92-3-102765-4.
21. Лукашин В. Н., Кречик В. А., Клювиткин А. А., Стародымова Д. П. Геохимия взвешенного вещества в маргинальном фильтре реки Преголи (Балтийское море) // Океанология. 2018. Т. 58, № 6. С. 933—947. doi: 10.1134/S0030157418060102. EDN SKUHJF.

### References

1. Mikhailov V. N., Mikhailova M. V., Magritsky D. V. Fundamentals of estuarine hydrology. Moscow: LLC «Publishing house TRIUMPH». 2018: 314 p. ISBN 978-5-89392-818-1. EDN LWFRFT. (In Russ.).
2. Povalishnikova E. S. Reasons for the penetration of sea water into rivers and its environmental consequences. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Moscow University Bulletin*. 2001; 5 (3): (20—28). (In Russ.). EDN: XSSXGL.
3. Mikhailova M. V. Processes of seawater intrusion into river mouths. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2013; 40 (5): (483—498). doi: 10.7868/S0321059613050052. EDN QYXJGV. (In Russ.).
4. Markova L. L., Nechay I. Ya. Hydrological outline of the mouth areas of the Neman and Pregolya rivers. *Proc. GOIN*. 1960; (49): (118—187). (In Russ.).
5. 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.).
6. Dornin D. A., Sokolov A. N. Features and regularities of the inflow of brackish masses in the lagoon-estuarine system of the Vistula Lagoon-Pregolya-Curonian Lagoon by means of contact measurement data and modeling. *Izvestija KGTU*. Bulletin of KSTU. 2014; (35): (11—20). [in Russian].
7. Polunina Ju. Ju., Stont Zh. I. Wind effect on zooplankton distribution in the estuary of the Pregolya River (the Baltic Sea Basin) after technogenic transformation of its riverbed. *Morskoj biologicheskij zhurnal = Marine Biological Journal*. 2022; 7 (1): (78—92). (In Russ.). doi: 10.21072/mbj.2022.07.1.07. EDN WLTBGF.
8. Dornin D. A., Pilipchuk V. A., Karmanov K. V. Formation of inflow of saltish water in the lagoon-estuarine system of Vistula Lagoon catchment and Pregolya River as a result of wind surges. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and technical sciences*. 2013; 6: (206—211). (In Russ.). EDN: RRREHH.
9. Chubarenko B., Dornin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). [In] R. Kosyan (ed.) *The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World*. Switzerland: Springer. 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9\_6.
10. 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.). doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3.
11. Pavlovskii A. A., Shamshurin V. I. Influence of Baltic Sea level rise on historic and cultural heritage of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021; (65): (681—693). doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-681-693.
12. 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.).
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon. Ecology of Baltic coastal waters. U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008; 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3\_8.
14. 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 = Hydrometeorology and ecology*. 2022; 69: (644—674). doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674. (In Russ.).
15. Mikhailov V. N., Gorin S. L. New definitions, regionalization, and typification of river mouth areas and estuaries as their parts. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2012; 39(3): 243 p. EDN OXXVOT.
16. Simov V. G., Morozov V. I., Fomina I. N. *Obmennye processy v prolivah mezhdu estuariyami i moryami*. Exchange processes in the straits between estuaries and seas. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ. 2016: 172 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9909013-0-8.
17. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva*. Hydrometeorological regime of the Vistula Lagoon. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 279 p. (In Russ.).

18. «*Raspisanie pogody*». «Weather schedule». (LLC) Licensed hydrometeorological company. Available at: <http://www.rp5.ru>. (accessed on: 05.04.2023). (In Russ.).
19. Officer Ch.B. Physical Oceanography of Estuaries (and associated coastal waters). N.Y.: Wiley Intersci. Publ. 1976: 465 p.
20. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. Studies and reports in hydrology. Paris: UNESCO. 1991; (50): 138 p. ISBN 92-3-102765-4.
21. Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuvitkin A. A., Starodymova D.P. Geochemistry of suspended particulate matter in the marginal filter of the Pregolya River (Baltic Sea). *Okeanologiya = Oceanology*. 2018; 58(6): (856—869). doi: 10.1134/S0030157418060102. EDN SKUHJF.

### ***Сведения об авторах***

*Надежда Вадимовна Двоеглазова*, аспирант Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград); ст. лаборант лаборатории прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), [nadya2eyes@mail.ru](mailto:nadya2eyes@mail.ru).

*Борис Валентинович Чубаренко*, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), [chuboris@mail.ru](mailto:chuboris@mail.ru).

### ***Information about authors***

*Nadezhda Vadimovna Dvodeglazova*, PhD student of Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad), assistant of the Laboratory of Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow).

*Boris Valentinovich Chubarenko*, PhD (Phys. and Math. Sci.), Head of the Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow).

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 9.07.2023*

*Принята к печати после доработки 15.11.2023*

*The article was received on 9.07.2023*

*The article was accepted after revision on 15.11.2023*



Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 105—119.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):105—119.

Научная статья  
УДК [556.535.5:621.396.96](282.256.6)  
doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-105-119

## **Картирование различного строения ледяного покрова на заторооопасном участке реки Лены методом георадиолокации**

*Максим Петрович Фёдоров, Лариса Лукинична Федорова*

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, mpfedoroff@gmail.com

*Аннотация.* В данной статье представлены результаты изучения строения ледяного покрова рек методом георадиолокации с борта летательного аппарата. На основе анализа полевых георадарных данных, полученных на заторооопасном участке р. Лены у с. Партизан в апреле 2022 г. и 2023 г., уточнены особенности волновых картин (радарограмм) ледяного покрова различного строения в предвесенний период. Использование разработанного алгоритма обработки и интерпретации данных георадиолокации позволило построить карту с отображением пространственного распределения толщины льда и его строения на исследуемом участке специальными маркерами. В практических целях результаты георадиолокации позволяют уточнить краткосрочный прогноз сроков вскрытия рек и скорректировать план превентивных мероприятий по разрушению ледяного покрова с толщиной, превышающей установленный норматив.

*Ключевые слова:* толщина льда, модели строения ледяного покрова, георадиолокация.

*Благодарности:* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>. Раздел «Методы исследований» выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

*Для цитирования:* Фёдоров М. П., Федорова Л. Л. Картирование различного строения ледяного покрова на заторооопасном участке реки Лены методом георадиолокации // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. 105—119. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-105-119.

Original article

## **Mapping of different ice cover structure in the jam-prone section of the Lena River by ground penetrating radar method**

*Maksim P. Fedorov, Larisa L. Fedorova*

Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, mpfedoroff@gmail.com

*Summary.* This article discusses the materials of studying the structure of river ice cover by the ground penetrating radar (GPR) method from the light-engine aircraft. Field GPR studies of the ice cover of the

Lena River were conducted on an area of 6 km<sup>2</sup> near the village of Partizan in April 2022 and 2023. An ice jam forms on this site each spring during the ice drift process. On the basis of the analysis of field GPR data the features of wave patterns (radargrams) of ice cover of different structure in the pre-spring period were specified. The use of the developed algorithm for processing and interpretation of the GPR data made it possible to construct a map showing the spatial distribution of ice thickness and its structure in the study area. According to the color classification of the ice thickness range, it was determined that the ice thickness in the studied area is heterogeneous. It was found that in 2022 the ice cover with a thickness of 100—150 cm prevails. And in 2023, lower values of ice thickness in the range of 50—100 cm are mainly observed. This is connected with abundant snowfalls in the winter of 2022—2023, which resulted in the slowing down of the ice cover growth process. At the same time, localised ice cover massifs of increased thickness within 150—200 cm were detected. With the help of special markers mapped and indicating the different structure of the ice cover, it was revealed in 2022 that monolithic ice was spread by 50 %, hummock ice occupies 49 % and fast ice only 1 %. According to the data for 2023, monolithic ice covers 36 % of the study area, hummocky ice covers 60 % of it, and fast ice covers only 4 % of it. At the same time, it should be noted that hummocky ice prevails in 24 % of cases compared to monolithic ice. For practical purposes, the results of the GPR can be used to refine the short-term forecast of river opening dates and adjust the plan of preventive measures to destroy the ice cover with a thickness exceeding the established norm.

*Keywords:* ice thickness, ice cover structure models, ground penetrating radar.

*Acknowledgements:* “This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>”. The section “Research Methods” was performed within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0020, reg No. 122011800086-1) with the use of equipment of the Shared core facilities of the Federal Research Center ‘YSC SB RAS’ (grant No. 13.SCF.21.0016).

*For citation:* Fedorov M. P., Fedorova L. L. Mapping of different ice cover structure in the jam-prone section of the Lena River by ground penetrating radar method. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):105—119. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-105-119.

## Введение

Вопрос борьбы с опасными ледовыми явлениями на водных объектах, оценка их потенциального риска на арктических территориях России актуальны для своевременного прогнозирования и принятия эффективных мер по их предотвращению. Например, ледовые заторы льда, формирующиеся в процессе вскрытия северных рек, сопровождаются резким подъёмом уровня воды, что приводит к опасным наводнениям. Так, ущерб, причинённый наводнениями экономике Республики Саха (Якутия) за период с 1998 г. по 2013 г., составил примерно 17,1 млрд. руб. [1].

В настоящее время в России и за рубежом в качестве дистанционного метода измерения толщины льда с борта летательного аппарата активно применяется метод георадиолокации, который решает следующие задачи: мониторинг толщины и состояния ледовых переправ на реках, определение толщины льда на участках речных переходов инженерных сооружений (трубопроводов, мостов и т. д.). При этом недостаточно изучается вопрос определения строения ледяного покрова [2]. Существующая потребность в разработке новых подходов к изучению ледяного покрова различного строения на масштабных территориях дистанционным методом измерений определяет актуальность представленных материалов исследований.

Изучение строения ледяного покрова рек методом георадиолокации рассмотрено на примере крупнейшей в Восточной Сибири реки Лены, которая течет

в северном направлении и впадает в море Лаптевых. Ежегодно с приходом холодной и продолжительной зимы на реке формируется ледяной покров. Ледообразование на реке Лене обычно начинается в октябре и быстро распространяется по всей длине реки [3, 4]. Процесс замерзания реки завершается установлением ледостава на средней Лене в районе г. Якутска, что происходит в первой декаде ноября. В период ледостава ледяной покров характеризуется строением, толщиной и прочностью льда, которые определяют несущую способность ледяного покрова, его способность разлома и сопротивления воздействию внешних сил [5—7].

По данным полевых наблюдений и аналитического обзора [8, 9], на реке Лене в основном преобладают береговой, монолитный и торосовый лёд, также встречаются наледный лёд у склонов надпойменных террас и шуговой лёд. Для описания строения льда была использована классификация Д. В. Козлова [3, 9], из которой следует, что монолитный лёд обычно образуется из однородных кристаллов, которые сформировались в спокойной обстановке, создавая гладкий прозрачный лёд с включенными воздушными пузырьками. Монолитный лёд прослеживается на спокойных участках реки. На мелководных участках реки ледяной покров при снижении уровня воды оседает на грунт с последующим примерзанием, такой лёд называется береговым. Сильные ветра и течения в реке вызывают взлом монолитного льда и его нагромождения, образуя торосовый лёд. При послойном замерзании воды, поступающей на поверхность ледяного покрова, образуется наледный лёд [10].

Толщина льда на реке Лене в период ледостава интенсивно увеличивается и достигает максимальных значений в апреле. В конце ледостава толщина льда может варьировать в пределах 100—250 см. Прочность ледяного покрова на сжатие и изгиб, по данным К. Н. Коржавина [9], при температуре, близкой к нулю градусов по Цельсию, составляет 450—650 кПа. С приходом весны ледяной покров подвергается тепловому воздействию солнечной радиации. При поглощении льдом тепла происходит поверхностное и внутреннее таяние, приводящее к увеличению пор, прослоек и появлению воды, под воздействием чего уменьшается толщина и прочность льда. По данным [11], прочность льда в период таяния снижается до 30 кПа.

При весеннем ледоходе характеристикой сопротивляемости ледяного покрова разрушению является относительная прочность, зависящая от типа строения льда и его толщины. Под воздействием динамических нагрузок со стороны водного потока и ветра, превышающим остаточную прочность льда, происходит дальнейший распад ледяного покрова на поля и льдины. В случае недостаточности кинетической энергии потока воды для дальнейшего разрушения скопления ледовых полей, находящегося ниже по течению участка, возможно образование ледового затора.

Таким образом, целью работы является изучение характеристик ледяного покрова на затороопасном участке реки Лены с применением разработанной методики георадиолокационного исследования с борта летательного аппарата.

### Методы и материалы исследования

Георадиолокация – это геофизический метод, основанный на излучении электромагнитных волн с последующим приёмом сигналов, отражённых от границ раздела слоёв зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [12—16]. Результатом георадарных исследований среды является радарограмма, представляющая собой набор трасс, каждая из которых показывает изменение во времени массива амплитуд сигнала. На радарограмме сигналы, отражённые от границ раздела сред, наблюдаемые максимумы и минимумы сигналов, а также их фазы, прослеживающиеся на соседних трассах, представлены в виде линии, известной как ось синфазности. Минимум полуволны отражённого сигнала отображается на оси синфазности в белом цвете, а максимум полуволны — в чёрном цвете.

В исследуемой среде (воздух—лёд—вода) возникают интенсивные отражения электромагнитных волн, которые обусловлены большой разницей в значениях диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость воздуха составляет  $\epsilon' = 1$  [13]. В диапазоне радиочастот диэлектрическая проницаемость пресного льда по материалам исследований [16—19] равна 3,2, а у воды — 81 [16]. Распространение электромагнитных волн в среде характеризуется скоростью  $\left( V, \frac{M}{нс} \right)$ , которая вычисляется по формуле:  $V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$ , где  $c = 0,3 \frac{M}{нс}$  — скорость распространения волны в вакууме. На радарограмме, определяя время задержки сигнала ( $\Delta t$ ), отражённого от границ исследуемой среды, и зная скорость распространения волны в этой среде, можно определить её толщину  $H = \frac{V \Delta t}{2}$  [12, 13].

Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в ледяном покрове различного строения в естественных условиях были выполнены на тестовых участках реки Лены около г. Якутска в марте—апреле 2022 г. и на затороопасном участке в районе села Партизан в апреле 2022 г. [20, 21], 2023 г. (рис. 1). Затороопасный участок расположен между Кангаласским мысом и местом впадения реки Алдан в реку Лену. Как следует из источника [22], в строении русла сочетаются особенности разных морфодинамических типов, Верхний участок русла извилист, образуя изгибы с периодичностью около 8—11 км, и имеет разветвления. Также на нем наблюдается многорукавность поймы. Средний и нижний участки русла разделены на рукава, которые направлены в сторону правого берега. Поймы на этой территории преимущественно расположены на левом берегу и имеют ширину 12—15 км. По этим причинам в этом месте происходят самые масштабные и значительные наводнения, вызываемые формированием заторов и приводящие к затоплению населенных пунктов (Едейцы, Партизан, Графский берег, П Хомустах) и пригородов г. Якутска [23].

До полевых измерений на исследуемом участке площадью 6 км<sup>2</sup> были намечены в геоинформационной системе QGIS три параллельных маршрута измерений

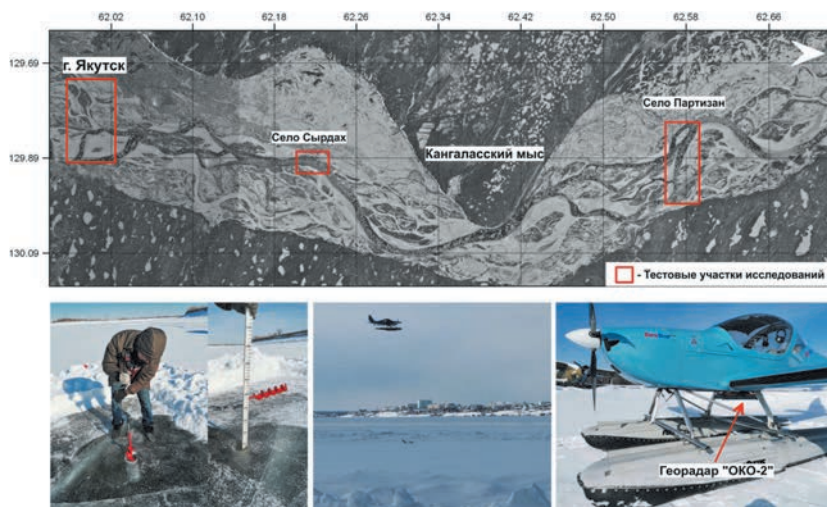


Рис. 1. Обзорный спутниковый снимок р. Лены на котором отмечены тестовые участки георадарных измерений с борта самолета EuroStar SLW.

Fig. 1. Overview satellite image of the Lena River, showing test sites of GPR measurements from the EuroStar SLW airplane.

вдоль русла реки. При этом были использованы спутниковые снимки предзимнего периода (Sentinel—2), так как на весенних спутниковых снимках сложно определить границы русла реки под снежным покровом. На снимках, сделанных перед началом зимы, хорошо видно незамерзшее русло, позволяющее спланировать маршруты измерений.

В ходе экспериментальных и полевых работ применялся георадар «ОКО-2» с модернизированным антенным блоком АБ400, позволяющим проводить дистанционные исследования. При апробации данного антенного блока на реке Лене абсолютная погрешность георадарных измерений толщины ледяного покрова составила 1,0 см, а относительная погрешность — 1,0 % [24]. При исследованиях ледяного покрова в районе с. Партизан применялся легкомоторный самолет EuroStar SLW. Такой выбор обусловлен рядом преимуществ данного типа самолетов: дальность полета до 1300 км, минимальная скорость полета 100 км/ч (крейсерская скорость 200 км/ч), возможность выполнения полетов на малых высотах и доступная стоимость аренды самолета. Создан специальный комплект креплений для монтажа антенного блока к днищу самолёта. В процессе измерений скорость полёта самолёта варьировалась от 100 до 150 км/ч при высоте полета 20—30 м. Навигация по маршруту измерений и привязка данных георадиолокации осуществлена посредством спутникового приемника. Управление георадаром «ОКО-2» во время измерений, ввод оптимальных параметров сканирования, наблюдение за процессом измерений и сохранение полевых данных осуществлялись посредством мобильного полевого компьютера с программным обеспечением

«GeoScan32». В рамках работ были получены 6 георадарных профилей, состоящих из 121 000 точек зондирований. Общая протяжённость профилей составила 53 км.

На тестовых участках было проведено бурение лунок, в которых измерена толщина льда ледомерной рейкой для заверки данных георадиолокации. После схода снежного покрова в первых числах мая 2023 г. были выполнены фотосъёмки поверхности ледяного покрова на затороопасном участке камерой квадрокоптера для уточнения результатов интерпретации.

### Результаты исследований

По данным экспериментальных исследований ледяного покрова различного строения на тестовых участках, выполнен анализ волновых характеристик радарограмм (симметричность, субгоризонтальность, нарушенность, фрагментность осей синфазности отраженных волн, амплитуда и фаза отражений). По итогам анализа были разработаны георадарные волновые картины моделей ледяного покрова различного строения: береговой лёд, монолитный лёд, торосовый лёд, ледяной покров, на поверхности которого вода [20, 21]. На рис. 2 приведены схемы рассмотренных моделей и их радарограммы.

Для отображения различных типов строения ледяного покрова на картах были предложены специальные маркеры, позволяющие оперативно проследить тип льда на исследуемом участке. Далее следует описание признаков волновых характеристик ледяного покрова различного строения:

— На радарограмме *берегового льда* наблюдаются устойчивые, прослеживаемые субгоризонтальные оси синфазности отраженных волн от верхней границы. Нижняя граница льда, контактирующая с грунтом, представлена слабоконтрастными осями синфазности с низкой амплитудой отраженных волн.

— На радарограмме *монолитного льда* отображаются протяженные субгоризонтальные оси синфазности отраженных волн от верхней границы. Нижняя граница монолитного льда в контакте с водой представлена субгоризонтальными осями синфазности, высокой амплитудой и сменой фазы отраженных волн.

— На радарограмме *торосового льда* прослеживаются нарушенные оси синфазности от верхней границы. На нижней границе прослеживаются оси синфазности отраженных и дифрагированных волн. Нижняя граница торосового льда в контакте с водой характеризуется высокой амплитудой и сменой фазы отраженных волн.

— На радарограмме *ледяного покрова*, на поверхности которого вода, прослеживаются контрастные оси синфазности отраженных волн и их многократные переотражения. Отражения на границе «воздух—вода» отмечаются высокой амплитудой.

По данным георадарных исследований физических моделей берегового льда, монолитного льда и торосового льда, выполнен статистический анализ амплитудных значений сигналов, отраженных от границ льда [20, 21]. Результаты показали, что средняя амплитуда от верхней границы берегового льда и монолитного



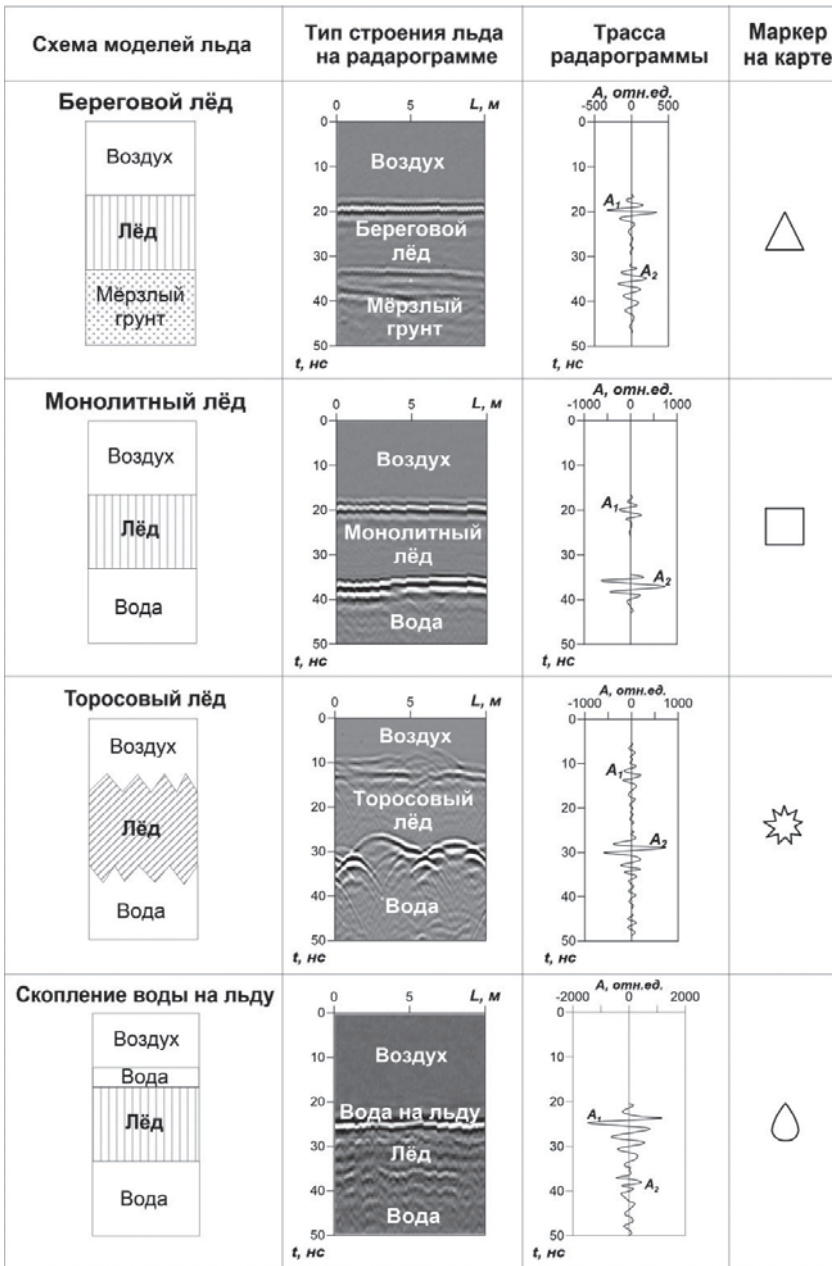


Рис. 2. Схемы моделей ледяного покрова различного строения и их георадарные волновые картины.

Fig. 2. Schematics of ice cover models of various structures and their GPR wave patterns.

льда — 360 и 225 отн. ед., от нижней границы — 161 и 629 отн. ед. соответственно. Коэффициент вариации амплитуд от верхней границы берегового и монолитного льда составил 18 % и 14 %, от нижней границы — 20 % и 19 % соответственно. На радарограмме торосового льда прослеживаются нарушенные оси синфазности отраженных и дифрагированных волн от границ льда. Амплитуда сигнала, отраженного от верхней границы торосового льда  $A_1 = 381$  отн. ед., от нижней границы  $A_2 = 1202$  отн. ед. Коэффициент вариации амплитуд от верхней границы торосового льда — 28 %, от нижней границы — 48 %. Высокие значения коэффициента вариации амплитуд отражений свидетельствуют о неровном, нарушенном ледяном покрове. Установлено, что значение коэффициента вариации амплитуды отраженных волн от ледяного покрова является одним из признаков определения типа строения ледяного покрова: меньше 20 % — береговой или монолитный лед; больше 28 % — торосовый лед.

Применение разработанного алгоритма обработки и интерпретации [20] позволило данные георадарных измерений в районе с. Партизан представить в виде карты. На первом этапе алгоритма в программе «GeoScan32» были применены следующие инструменты обработки радарограмм: редактирование полученного набора трасс; устранение помех и прямого сигнала; восстановление разрешения полезных сигналов и привязка точек зондирования с географическими координатами по полученным данным GPS приёмника. На втором этапе была интерпретация обработанных радарограмм с помощью признаков ледяного покрова различного строения [20, 21]. На третьем этапе применен модуль программы «Слои на профиле», с помощью которого выделены установленные оси синфазности отражённых волн от верхней и нижней границы льда. Инструментом модуля «Выпрямление» устранено влияние нестабильной высоты полёта самолёта на радарограммах. Временной разрез с выделенными границами льда был преобразован с учётом диэлектрической проницаемости пресного льда в глубинный разрез.

В качестве примера приведён фрагмент радарограммы (рис. 3), на которой прослеживаются оси синфазности отражённых волн от верхней (I) и нижней (II) границ льда. По признакам были определены монолитный лёд и торосовый лёд. Также установлено, что лёд контактирует с водой по наличию высокой амплитуды сигналов отражённых волн от нижней границы льда. В результате обработки проинтерпретированных радарограмм была создана база данных, содержащая набор данных о толщине и строении льда с географическими координатами.

На последнем этапе обработки реализуется разработанный нами алгоритм визуализации данных георадиолокации в геоинформационной системе QGIS. Эта система позволяет отображать, редактировать и управлять данными, а также создавать на их основе информационные продукты. Процесс визуализации включает в себя: создание нового проекта, загрузку слоя карты OpenStreetMap и добавление слоя из текстового файла. Далее следует настройка стиля маркеров для отображения строения льда, а также настройка стиля и классификация значений толщины льда. Дополнительно осуществлена цветовая заливка толщины льда по маршруту исследования в соответствии с классификацией. Затем создан макет карты, который экспортируется в виде изображения. Также можно создать интерактивную

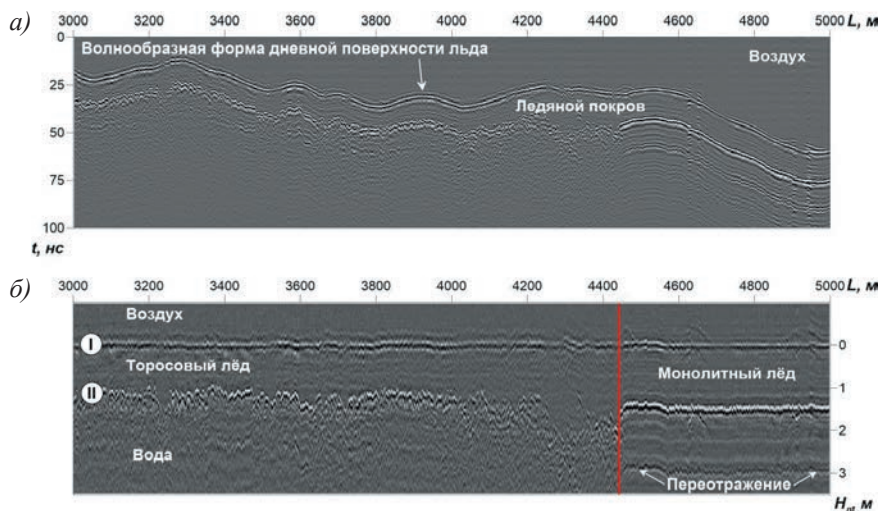


Рис. 3. Результат георадарных исследований ледяного покрова:

- a)* исходный фрагмент радарограммы;
- б)* проинтерпретированный фрагмент радарограммы с установленным строением льда.

Fig. 3. Result of GPR studies of the ice cover:

- a)* initial fragment of the radargram;
- b)* interpreted fragment of the radargram with the established ice structure.

веб-страницу в формате html, содержащую информацию о толщине и строении льда.

На рис. 4 представлены карты с маршрутами георадарных исследований, созданные с помощью QGIS. Влияние сильного ветра в процессе измерений с борта самолета привело к отклонению от заданного маршрута, что отразилось на карте в виде непрямолинейных маршрутов исследования и залетов на осередки, обозначенные на маршруте коричневым цветом. Максимальное расстояние между маршрутами было 400 м, а минимальное расстояние — 50 м. На рис. 4 маркеры представлены с интервалом 80 м, что позволяет наглядно показать пространственную изменчивость толщины и строения льда.

Данные георадиолокации показали, что ледовая обстановка в конце ледостава 2022 г. и 2023 г. имела различные условия формирования ледяного покрова. В 2022 г. преобладает ледяной покров толщиной 100—150 см (рис. 4 *a*). В 2023 г. по маршрутам наблюдаются в основном пониженные значения толщины льда в пределах 50—100 см (рис. 4 *б*). Это связано с обильными снегопадами зимой 2022—2023 гг., которые привели к замедлению процесса нарастания ледяного покрова. При этом выявлены локализованные массивы ледяного покрова повышенной толщины в пределах 150—200 см. Специальными маркерами обозначены установленные типы строения ледяного покрова на карте. По маркерам можно проследить изменения строения льда по маршруту исследования. Анализ данных

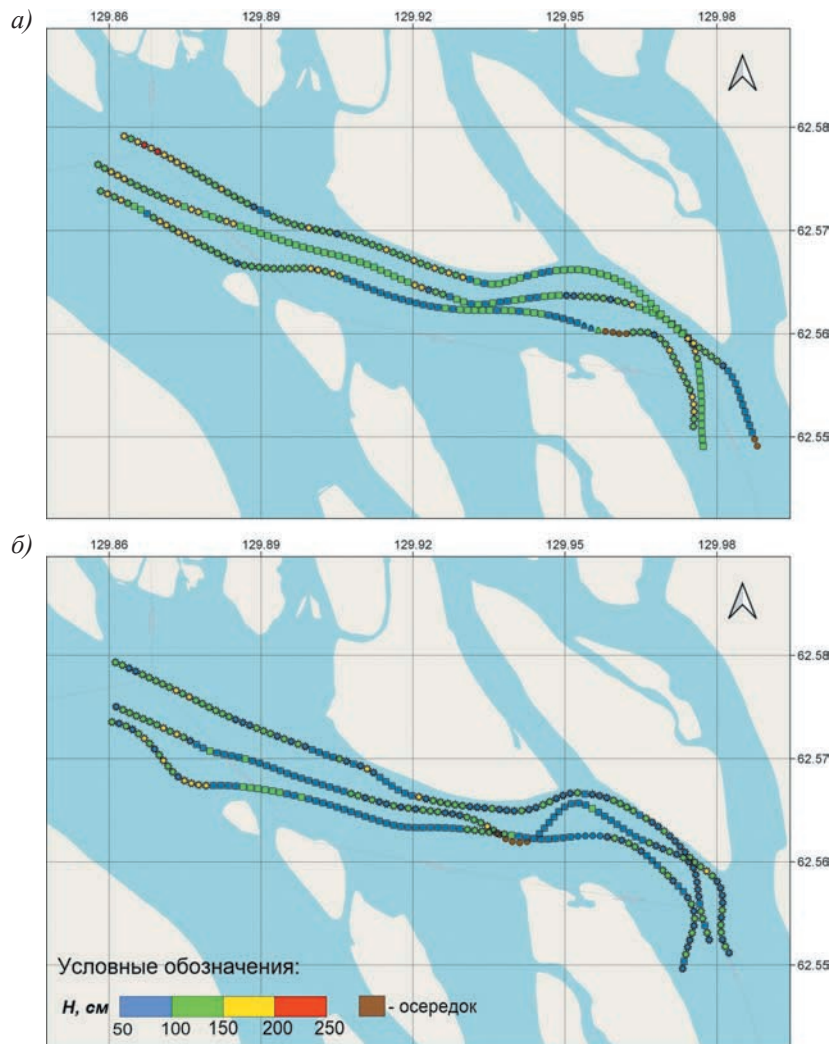


Рис. 4. Карта распределения толщины и строения льда около села Партизан, по данным георадиолокации, полученным в апреле 2022 г. (а) и 2023 г. (б).

Fig. 4. Map of ice thickness distribution and structure near Partizan village according to the GPR data obtained in April 2022 (a) and 2023 (b).

о строении льда показал, что в 2022 г. монолитный лёд был распространён на 50 %, торосовый лёд — на 49 % и береговой лёд — на 1 %. По данным 2023 г., на участке исследования монолитный лёд распространён на 36 %, торосовый лёд — на 60 % и береговой лёд — на 4 %. При этом отмечается, что торосовый лёд преобладает на 24 % по сравнению с монолитным льдом.



Рис. 5. Фотография поверхности ледяного покрова около села Партизан.

Fig. 5. Photograph of the ice cover surface near Partizan village.

Установленные различные типы строения, по данным георадиолокации, подтверждаются фотографиями поверхности ледяного покрова. На рис. 5 представлен пример снимка, полученного со стороны северо-западного направления. Визуальный анализ снимков показал, что ледяной покров в русле реки выражен от темного до светло-серого оттенка. Темная зона поверхности ледяного покрова соответствует монолитному льду, а светло-серая зона относится к торосовому льду.

Из работы [11] следует, что монолитный лёд обладает высоким коэффициентом прозрачности, в среднем 0,96—0,98. Неоднородный лёд (торосовый лёд и шуговой лёд), состоящий из беспорядочно смёрзшихся кристаллов, содержащих большое количество пузырьков воздуха и твёрдых частиц, является малопрозрачным. Коэффициент прозрачности такого льда колеблется в пределах от 0,47 до 0,52. Он характеризуется неравномерным поглощением и рассеянием солнечной радиации. Следовательно, наибольшая интенсивность внутреннего таяния у монолитного льда, в то время как у торосового льда таяние происходит с поверхности. Можно предположить, что участки монолитного льда в большей степени готовы к динамическому разрушению, нежели участки торосового льда.

### Заключение

На примере реки Лены рассмотрено изучение различного строения ледяного покрова рек методом георадиолокации. По материалам исследований были разработаны георадарные волновые картины моделей ледяного покрова различного строения: береговой лёд, монолитный лёд, торосовый лёд, ледяной покров, на поверхности которого вода. При этом установлены соответствия характеристик осей синфазности отраженных волн (симметричность, субгоризонтальность, нарушение, фрагментность) типу строения ледяного покрова. Статистический



анализ амплитудных значений сигналов, отраженных от границ ледяного покрова различного строения, показал, что значение коэффициента вариации амплитудных значений сигналов, отраженных от границ льда, является одним из признаков определения типа строения ледяного покрова: меньше 20 % — береговой или монокристаллический лёд; больше 28 % — торосовый лёд.

Усовершенствован метод планирования маршрутов с применением спутниковых снимков, полученных в предзимний период, что позволяет повысить результативность исследований. Следование по запланированному маршруту и пространственная привязка положения точек зондирования георадара осуществляется при помощи GPS приёмника. Разработан алгоритм обработки данных георадарных исследований, обеспечивающий достоверное определение толщины льда и распознавание типов строения ледяного покрова. Разработан алгоритм визуализации результатов георадиолокации с применением геоинформационной системы QGIS, позволяющий построить карты с отображением толщины и строения ледяного покрова по маршрутам исследований.

Апробация разработанной методики георадиолокационного исследования ледяного покрова северных рек позволила построить карты пространственного распределения толщины и строения ледяного покрова на затороопасном участке р. Лены в районе села Партизан. Установлено, что ледовая обстановка в конце ледостава 2022 г. и 2023 г. имела различные условия формирования ледяного покрова. В 2022 г. преобладает ледяной покров толщиной 100—150 см. В 2023 г. по маршрутам наблюдаются в основном пониженные значения толщины льда в пределах 50—100 см. При этом выявлены локализованные массивы ледяного покрова повышенной толщины в пределах от 150 до 200 см. Анализ данных о строении льда показал, что в 2022 г. монокристаллический лёд был распространён на 50 %, торосовый лёд — на 49 % и береговой лёд — на 1 %. По данным 2023 г., на участке исследования монокристаллический лёд распространён — на 36 %, торосовый лёд — на 60 % и береговой лёд — на 4 %. При этом отмечается, что торосовый лёд преобладает на 24 % по сравнению с монокристаллическим льдом.

В практических целях результаты георадиолокации позволяют уточнить краткосрочный прогноз сроков вскрытия рек и скорректировать план превентивных мероприятий по разрушению ледяного покрова с толщиной, превышающей установленный норматив, для обеспечения безопасного прохождения льда в период весеннего ледохода.

### *Список литературы*

1. Бурцева Е. И., Парфенова О. Т. Экономический ущерб от наводнений на реках Республики Саха (Якутия) // Проблемы современной экономики. 2015. № 1(53). С.256—259.
2. Федоров А. А., Шамаев С. Д., Давыдова Т. А. Аналитический обзор современного состояния георадиолокационных исследований ледяного покрова рек // Сборник трудов VI международной конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». М.: Перо, 2022. С. 232—235.
3. Козлов Д. В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. М.: МГУП, 2000. 263 с.
4. Голубев В. Н. Формирование ледового покрова на пресноводных водоемах и водотоках // Вестник Московского университета. Сер.5. География. 2014. № 2. С. 9—16.



5. Аржакова С. К. Зимний сток рек криолитозоны России. М.: РГГМУ, 2001. 209 с.
6. Лобанов В. А., Горошкова Н. И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 86—98. doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
7. Чижов А. Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 128 с.
8. Зайцев А. А., Кирик О. М., Михайлов В. С. Взаимодействие речного льда с руслом на р. Лене и её притоках // Эрозия почв и русловые процессы. 2008. Вып. 16. С. 242—262.
9. Козлов Д. В. Моделирование ледовых явлений. М.: ИВП, 2020. 145 с.
10. Козлов Д. В., Бузин В. А., Фролова Н. Л. и др. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России. М.: РГАУМСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.
11. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 248 с.
12. Мачерет Ю. Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
13. Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
14. Дьяков А. Ю., Калашник А. И. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2021. 110 с. doi: 10.37614/978.5.91137.443.3
15. Jol Н. М. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Amsterdam Netherlands. 2009. 544 p.
16. Annan А. P. Ground Penetrating Radar Applications Procedures & Principles. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors and Software GPR Manual.pdf> (дата обращения 20.05.2023).
17. Matzler С., Wegmuller U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies // J. Physics D: Applied Physics. 1987. Vol. 20. P. 1623—1630. doi:10.1088/0022-3727/20/12/013
18. Fujita F., Matsuoka T., Ishida T., et al. A summary of the complex dielectric permittivity of the in the megahertz range and its application for radar sounding of polar ice sheets // Physics of the ice core (ed. Hondoh). Hokkaido University Press, 2000. P. 185—212.
19. Matsuoka T., Fujita F., Morishima S., Mae S. Precise measurement of dielectric anisotropy in ice Ih at 39 GHz // J. Applied Physics. 1997. Vol. 81. №5. P. 2344—2348.
20. Fedorov M. P., Fedorova L. L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. doi: 10.1109/LGRS.2022.3225560. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564>. (дата обращения: 20.05.2023)
21. Фёдоров М. П., Федорова Л. Л. Исследование строения ледяного покрова на затороопасных участках р. Лена методом георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 130—135. doi:10.17513/use.37920
22. Андросов И. М., Завадский А. С. Оценка негативного воздействия вод реки Лены на населенные пункты Республики Саха (Якутия) // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: РУДН, 2014. Т. 1. С. 5—16.
23. Федеральное агентство водных ресурсов ФГУ «Востсибрегионводхоз» Аналитический отчет о результатах наблюдений за состоянием водных объектов в зоне деятельности ФГУ «Востсибрегионводхоз» за 2011 г. Иркутск, 2012. 128 с.
24. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V. Investigation of the Lena river ice cover by GPR from helicopter / 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2012. doi: 10.1109/ICGPR.2012.6254958 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254958/> (дата обращения: 20.05.2023).

### References

1. Burtseva E. I., Parfenova O. T. Economic damage caused by floods of the rivers in Sakha Republic (Yakutia). *Problemy sovremennoj ekonomiki = Problems of modern economics*. 2015; 1(53): (256—259). (In Russ.).

2. Fedorov A. A., Shamaev S. D., Davydova T. A. Analytical review of the current state of georadiolocation studies of river ice cover. *Sbornik trudov VI mezhdunarodnoj konferencii Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya = Proceedings of the VI International Conference Hydrometeorology and ecology: achievements and prospects of development*. Moscow: Pero, 2022; (232—235). (In Russ.).
3. Kozlov D. V. *Led presnovodnykh vodoemov i vodotokov = Ice in freshwater reservoirs and watercourses*. Moscow: MSUP, 2000: 263 p. (In Russ.).
4. Golubev V. N. Formation of ice cover on fresh-water reservoirs and water courses. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Moscow University Bulletin*. 2014; (2): (9—16). (In Russ.).
5. Arzhakova S. K. *Zimnij stok rek kriolitozony Rossii = Winter runoff of rivers of the cryolithozone of Russia*. Moscow: RSHMU, 2001: 209 p. (In Russ.).
6. Lobanov V. A., Goroshkova N. I. Characteristics of the ice regime of the rivers of the Sakha Republic (Yakutia) and their climatic changes. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific Notes of the RSHMU*. 2019; (55): (86—98). (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
7. Chizhov A. N. *Formirovanie ledyanogo pokrova i prostranstvennoe raspredelenie ego tolshhiny = Ice cover formation and spatial distribution of its thickness*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 128 p. (In Russ.).
8. Zaitsev A. A., Kirik O. M., Mikhailov V. S. Interaction of river ice with the channel on the Lena River and its tributaries. *Eroziya pochv i ruslovye processy = Soil erosion and channel processes*. 2008; (16): (242—262). (In Russ.).
9. Kozlov D. V. *Modelirovanie ledovykh yavlenii = Modeling of ice phenomena*. Moscow, 2020: 145 p. (In Russ.).
10. Kozlov D. V., Buzin V. A., Frolova N. L. et al. *Opasnye ledovye yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh Rossii = Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia*. Moscow: RGAUMSHA, 2015: 348 p. (In Russ.).
11. Donchenko R. V. *Ledovyi rezhim rek SSSR = Ice regime of the rivers of the USSR*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 248 p. (In Russ.).
12. Macheret Y. Ya. *Radiozondirovanie lednikov = Radiosounding of glaciers*. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. (In Russ.).
13. Vladov M. L., Sudakova M. S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii = GPR. From physical foundations to promising directions*. Moscow: GEOS, 2017: 240 p. (In Russ.).
14. Dyakov A. Y., Kalashnik A. I. *Metodicheskie osnovy georadarnykh issledovaniy gornotekhnicheskikh ob"ektov = Methodical bases of GPR studies of mining objects*. Apatity: FIC KSC RAS, 2021: 110 p. (In Russ.). doi: 10.37614/978.5.91137.443.3
15. Jol H. M. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Amsterdam Netherlands. 2009: 544 p.
16. Annan A. P. *Ground Penetrating Radar Applications Procedures and Principles*. Available at: <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors and Software GPR Manual.pdf> (accessed on 20.05.2023).
17. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies. *J. Physics D: Applied Physics*. 1987; (20): 1623—1630. doi:10.1088/0022-3727/20/12/013
18. Fujita F., Matsuoka T., Ishida T., et al. A summary of the complex dielectric permittivity of the in the megahertz range and its application for radar sounding of polar ice sheets. *Physics of the ice core (ed. Hondoh)*. Hokkaido University Press. 2000: 185—212.
19. Matsuoka T., Fujita F., Morishima S., Mae S. Precise measurement of dielectric anisotropy in ice Ih at 39 GHz. *J. Applied Physics*. 1997; 81(5): 2344—2348.
20. Fedorov M.P., Fedorova L.L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022. doi: 10.1109/LGRS.2022.3225560. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564>. (accessed on: 20.05.2023)
21. Fedorov M. P., Fedorova L. L. Study of the structure of the ice cover in the ice hazardous areas of the Lena River by GPR method. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2022; (10): (130—135). (In Russ.). doi:10.17513/use.37920
22. Androsov I. M., Zavatsky A. S. Assessment of the negative impact of the Lena River waters on the settlements of the Republic of Sakha (Yakutia). *Trudy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi*

- konferentsii «Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoi zony morei»* = Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «Dynamics and thermodynamics of rivers, reservoirs and coastal zones of seas». Moscow: RUDN, 2014; (1): (5—16).
23. Federal Agency for Water Resources FGU “Vostsibregionvodkhoz” Analytical report on the results of observations of the state of water bodies in the area of FGU “Vostsibregionvodkhoz” for 2011. Irkutsk, 2012: 128 p. (In Russ.).
  24. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V. Investigation of the Lena river ice cover by GPR from helicopter. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2012. doi: 10.1109/ICGPR.2012.6254958 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254958/> (accessed on: 20.05.2023).

### ***Информация об авторах***

*Максим Петрович Фёдоров*, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, научный сотрудник, [mpfedoroff@gmail.com](mailto:mpfedoroff@gmail.com).

*Лариса Лукинична Федорова*, канд. техн. наук, доцент, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, ведущий научный сотрудник, [Lar-fed-90@rambler.ru](mailto:Lar-fed-90@rambler.ru).

### ***Information about authors***

*Maksim Petrovich Fedorov*, Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, researcher.

*Larisa Lukinichna Fedorova*, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor. Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, leading researcher.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 10.08.2023*

*Принята к печати после доработки 15.02.2024*

*The article was received on 10.08.2023*

*The article was accepted after revision on 15.02.2024*

Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 120—134.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):120—134.

## ***ЭКОЛОГИЯ***

---

Научная статья

УДК [628.171:711.455](571.151)(571.14)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-120-134

### **Рекреационное водопотребление в туристских дестинациях Алтайского края и Новосибирской области: расчет и пространственный анализ**

***Ирина Владимировна Андреева, Ирина Владимировна Архипова,  
Светлана Владимировна Циликина***

ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Барнаул, Россия, rgo.alt\_22@inbox.ru

*Аннотация.* В статье представлен авторский подход к определению водопотребления в рекреационных местностях. С учетом специфики пространственных и инфраструктурных особенностей Алтайского края и Новосибирской области проведена оценка ресурсной обеспеченности и производимых воздействий на рекреационные среды. На основе анализа данных о количестве, номерном фонде и благоустройстве, сезонности средств размещения рассчитаны годовые величины водопотребления из поверхностных и подземных вод или систем водоснабжения рекреационных объектов в разрезе туристских дестинаций обоих регионов. Перспективы исследования ориентированы на оценку сброса отработанных вод и поступления антропогенных загрязнителей в окружающую среду в результате рекреационной деятельности.

*Ключевые слова:* рекреационное водопользование, рекреационное водопотребление, рекреационная инфраструктура.

*Для цитирования:* Андреева И. В., Архипова И. В., Циликина С. В. Рекреационное водопотребление в туристских дестинациях Алтайского края и Новосибирской области: расчет и пространственный анализ // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. 120—134. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-120-134.

## ***ECOLOGY***

---

Original article

### **Recreational water use in tourist destinations of Altai Region and Novosibirsk Oblast: calculation and spatial analysis**

***Irina V. Andreeva, Irina V. Arkhipova, Svetlana V. Tsilikina***

Institute for water and environmental problems SB RAS, Barnaul, Russia, rgo.alt\_22@inbox.ru

*Summary.* The article presents the author's approach to the definition of water consumption in recreational areas. Using the example of the Altai Territory and the Novosibirsk Region, the possibilities

---

© Андреева И. В., Архипова И. В., Циликина С. В., 2024

of an approach for determining the resource availability and the effects of recreational infrastructure on recreational environments are shown. The methodological and ideological basis of the approach is formed by the concepts and provisions of recreational geography, in particular the theory of recreational capacity and, above all, current recreational capacity. The concept borrowed from ecotourism is adapted to hospitality facilities — the main agents of direct water consumption in recreation. The mathematical apparatus is described and its possibilities for quantitative calculations of recreational sphere water consumption are shown. The input data for calculating water consumption is information about the quantity, number of rooms and water supply, as well as the seasonality of the accommodation facilities. The resulting indicator is the number of water users (upper limit). Further applied calculations using it make it possible to determine both the volume of total water consumption and wastewater disposal, as well as the amount of anthropogenic pollutants entering the environment. For key regions, the results of calculation and comparative analysis of annual water consumption values in the context of tourist destinations are presented.

*Keywords:* recreational water use, recreational water consumption, recreational infrastructure

*For citation:* Andreeva I. V., Arkhipova I. V., Tsilikina S. V. Recreational water use in tourist destinations of Altai Region and Novosibirsk Oblast: calculation and spatial analysis. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):120—134. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-120-134.

## Введение

Рекреационное водопользование связано с водой через мотивацию, косвенное использование и/или непосредственное потребление. Оно реализуется в разных форматах: от стороннего созерцания до прямых забора и сброса отработанных вод. Рекреационное водопотребление — изъятие воды из водных объектов, подземных вод или водопроводных систем для функционирования инфраструктуры и удовлетворения физиологических потребностей рекреантов и персонала — одна из самых активных и агрессивных его форм. Изъятие ресурса и возвращение стоков в окружающую среду сопряжено с рисками химического и микробного загрязнения, снижения качества и количества водных ресурсов. В связи с растущей ролью туризма в экономике вопросы оценки этих процессов актуализировались.

Наибольшая плотность населения и наличие самых благоприятных природных рекреационных условий в Западной Сибири вывели Республику Алтай, Алтайский край и Новосибирскую область в региональные лидеры по уровню развития туризма. За последние два десятилетия предпочтения отдыхающих в них сместились в сторону комфортного размещения на турбазах, в санаториях и курортах. Вслед за спросом активизировалось благоустройство объектов гостеприимства, что повлекло за собой увеличение водопотребления. Объемы изъятия вод и сбросов, а также пространственные и инфраструктурные особенности этих процессов остаются недостаточно изученными и оцененными. Вместе с тем, важность таких знаний для текущего планирования отрасли, обеспечения ее стратегической ресурсной и экологической безопасности очевидна.

Феномен рекреационного водопотребления многогранен. Этот факт в совокупности с дефицитом отраслевых сведений и несовершенством теории затрудняет практические расчеты используемой в рекреации воды, а также утилизируемых вод и поступающих с ними в окружающую среду антропогенных загрязнителей. В статье описан подход к расчету водопотребления в рекреационных местностях. Возможности подхода продемонстрированы на примере южносибирских регионов, а результаты расчетов подвергнуты пространственно-временному анализу.

Цель статьи — минимизация теоретико-методических пробелов в области рекреационного водопользования, связанных с недостатком сведений о потребителях и туристской инфраструктуре, оценкой ресурсной обеспеченности и производимых воздействий на рекреационные среды.

### Объекты и методы

Рекреационное водопользование — виды отдыха, спорта, туризма на воде и рядом с ней [1], формирующие комплекс специфичных форм, воздействий, взаимосвязей и взаимозависимостей, возникающих в рекреации на контакте гидросферы с другими средами: природными (атмосфера, литосфера, биосфера), социальными (общество, сообщество, человек), экономическими (отрасль, услуга, потребитель) [2].

Рекреационное водопотребление — прямой забор воды из поверхностных и подземных вод или систем водоснабжения для удовлетворения физиологических потребностей рекреантов и персонала, благоустройства номерного фонда, обеспечения служб и др. [2].

Инфраструктура туризма (рекреационная инфраструктура) — комплекс сооружений, сетей и предприятий для обслуживания туристов и обеспечения функционирования туристско-рекреационной сферы. Включает базовые объекты (дорожная сеть, коммуникации, водо-, тепло-, газо- и электроснабжение, водоотведение, связь и др.), средства размещения (гостиницы, дома отдыха, коттеджи и др.), сопутствующую инфраструктуру (предприятия питания, индустрию развлечений и др.) [3].

Туристская дестинация — территория прибытия, обеспеченная туристской инфраструктурой, достопримечательностями, сервисом [4].

Средства размещения — ключевой элемент туристской инфраструктуры, его отсутствие обозначает отсутствие организованного туризма [3, 5]. В этой связи исследование игнорирует группы услуг и объектов туристской инфраструктуры, связанные с транспортным и информационным обеспечением, торговлей и общественным питанием, организацией досуга и др. Оно сосредоточено на объектах гостеприимства (гостиницы, санатории, дома и базы отдыха и др.), их коммунальных системах (благоустройство). Наличие и технические характеристики этих систем определяют уровень комфорта средств размещения, а, следовательно, объемы потребления воды и возврата ее в виде стоков.

Пространственно-территориальными единицами исследования являются восемь дестинаций на территории Алтайского края и шесть — в Новосибирской области. В Алтайском крае дестинации сформированы на базе национально значимых рекреационных ресурсов: родоновых вод курорта Белокурихи, рапы и лечебных грязей соленых озер Кулундинской низменности, сплавных рек горной части края. В Новосибирской области — на базе оздоровительных и промысловых рекреационных ресурсов Новосибирского водохранилища, рек Бердь и Иня, озер Чаны и Карачи. Дестинации представляют собой местности с развитой рекреационной инфраструктурой, различаются специализацией, связаны со знаковыми для регионов водными объектами, соотношены с муниципальными границами.



Принципиально значимыми для исследования являются характеристики местоположения объектов исследования.

Во-первых, дестинации околородного отдыха, относятся преимущественно к сельским локациям (Обское море — исключение). В них собственное население малочисленно (например, в Белокурихе, курорте федерального значения, — 15 тыс. чел.). На этом фоне число приезжих отдыхающих весьма значимо.

Во-вторых, благоустройство объектов гостеприимства в сельской местности, как правило, примитивно, а местный водоканал курирует лишь централизованное водоснабжение. Чаще водоснабжение осуществляется из личных скважин, сброс происходит в лучшем случае в септики, обычно — в выгребные ямы. Таким образом, сброс стоков не организован и не контролируем. Учитывая местоположение объектов гостеприимства (на берегу, практически у уреза воды), значительная часть стоков попадает в грунтовые и поверхностные воды. Учитывая близость источника воздействия и небольшие размеры водных объектов, загрязнения следует признать существенными.

В-третьих, часть дестинаций находится на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) или близко к ним: Алтайская («Бирюзовая Катунь» и «Сибирская монета») — в природном парке «Ая», Белокурихинская (курорт «Белокуриха») — в природном парке «Предгорье Алтая», Егорьевская — в заказнике «Егорьевский», Завьяловская — в заказнике «Завьяловский», Славгородская — памятник природы «Озеро Большое Яровое», Смоленская — заказник «Лебединный», Чарышская — заказник «Чарышский», Чаны-Карачи — заказники «Кирзинский», «Юдинский», «Чановский», «Майское утро». Воздействия в таких масштабах на охраняемые экосистемы требуют особого внимания и оценки.

Методическую основу исследования составляют положения комплекса методов: от междисциплинарных камеральных и полевых до специфичных узкоотраслевых. Так, исходные данные получены из открытых источников: официальных сайтов регионов, Управления Алтайского края по развитию туризма и курортной деятельности, Министерства экономического развития Новосибирской области, сайтов путешествий и бронирования, сайтов курортов, санаториев и туристских объектов других категорий. На этом этапе получены сведения о вместимости, номерном фонде и сезонности объектов размещения. Эти данные являются относительно неизменными (постоянной величиной, константой) в сравнении со спросом (заполняемостью номерного фонда), что позволяет рассчитывать на определенную достоверность результата, прежде всего — его верхнего значения. Выделение дестинаций осуществлено методами сводки и группировки данных, посредством картографирования и картографического анализа.

Далее эти данные уточнялись и детализировались непосредственно на месте — в дестинациях. Для этого проводились полевые исследования в форме анкетирования. В анкету вошли вопросы о количестве и назначении зданий на земельном участке, количестве гостевых мест, численности персонала, наличии удобств, а результат выражен в обобщенной информации об объектах размещения и благоустройстве номерного фонда (табл. 1, 2).

Характеристика объектов гостеприимства  
Characterisation of hospitality facilities

Дестинация*	Количество объектов размещения, ед.			Количество мест в объектах размещения**, ед.		
	Круглый год	Лето	Σ	Круглый год	Лето	Σ
<i>Алтайский край</i>						
Алтайская,	57	22	79	5296	1717	7013
в т.ч. в круглогодичных санаториях и курортах***	1	0	1	130	0	130
Белокурихинская,	76	0	76	6198	0	6198
в т.ч. в санаториях	16	0	16	4592	0	4592
Егорьевская	2	7	9	60	1251	1311
Завьяловская	5	26	31	110	1422	1532
Славгородская,	7	32	39	258	1594	1849
в т.ч. в санаториях	1	0	1	150	0	150
Смоленская	10	2	12	396	36	421
Чарышская	11	4	15	128	62	190
Чумышская	19	3	22	1044	50	1094
Σ <sub>Алтайский край</sub>	<b>187</b>	<b>96</b>	<b>283</b>	<b>13490</b>	<b>6132</b>	<b>19608</b>
<i>Новосибирская область</i>						
Верхнеобская	8	4	12	146	58	204
Обское море,	43	14	57	3270	2053	5323
в т.ч. в санаториях	8	0	8	1283	0	1283
Нижнеобская,	17	4	21	2010	649	2659
в т.ч. в санаториях	5	0	5	1156	0	1156
Бердская,	8	0	8	449	40	489
в т.ч. в санаториях	1	0	1	100	0	100
Инская,	4	0	4	158	0	158
в т.ч. в санаториях	1	0	1	120	0	120
Чаны-Карачи,	18	0	18	1624	430	2054
в т.ч. в санаториях	4	0	4	1305	0	1305
Σ <sub>Новосибирская область</sub>	<b>63</b>	<b>20</b>	<b>119</b>	<b>7657</b>	<b>3230</b>	<b>10887</b>
Σ	<b>250</b>	<b>116</b>	<b>402</b>	<b>21147</b>	<b>9362</b>	<b>30495</b>

Примечание: \* — дестинации Алтайская, Егорьевская, Завьяловская, Славгородская, Смоленская, Чарышская соответствуют одноименным административным районам Алтайского края, Белокурихинская — муниципальному образованию г. Белокуриха, Чумышская включает Залесовский, Заринский и Тальменский административные районы. Дестинация Обское море включает административные районы Новосибирской области, расположенные на побережье Новосибирского водохранилища (Ордынский и Искитимский районы, г. Бердск). Верхнеобская дестинация расположена на побережье реки Оби выше верхнего бьефа (Сузунский район), Нижнеобская — ниже нижнего бьефа (Новосибирский район). Дестинация Инская включает Тогучинский административный район, Бердская — Маслянинский, Чаны-Карачи — Барабинский и Чановский районы. \*\* — суммарно основные и дополнительные места. \*\*\* — далее — в т.ч. в санаториях.

Таблица 2

Число мест по элементам благоустройства, ед.  
Number of places by elements of improvement, units

Дестинация	Общий душ		Душ во всех номерах		Ванная во всех номерах	
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето
<i>Алтайский край</i>						
Алтайская,	3879	4729	391	734	998	998
Белокурихинская	1401	1401	288	288	4509	4509
Егорьевская	0	1295	16	16	0	0
Завьяловская	72	1317	38	205	0	0
Славгородская	0	573	147	618	116	658
Смоленская	245	290	40	40	96	102
Чарышская	21	70	38	70	0	0
Чумышская	310	365	487	522	0	0
<b>Σ</b>	<b>5928</b>	<b>10040</b>	<b>1445</b>	<b>2493</b>	<b>5719</b>	<b>6267</b>
<i>Новосибирская область</i>						
Верхнеобская	8	8	100	112	0	0
Обское море	442	1588	2988	3295	0	0
Нижнеобская	408	985	1582	1612	0	0
Бердская	13	93	422	422	0	0
Инская	138	138	20	20	0	0
Чаны-Карачи	1206	1206	1756	1756	28	28
<b>Σ</b>	<b>2215</b>	<b>4018</b>	<b>6868</b>	<b>7217</b>	<b>28</b>	<b>28</b>

Для прикладных расчетов использован авторский метод, включающий, помимо этапов сбора исходных данных и обособления дестинаций, определение количества потребителей воды, выраженного в человеко-сутках (чел/сут). В основе расчетов — адаптированные положения методики Текущей (рекреационной) емкости (ТЕ), разработанной за рубежом для количественной оценки нагрузки на рекреационные экскурсионные тропы в природных парках [5, 6]. В частности, заимствован показатель «физическая текущая емкость» ( $F$ ), обозначающий максимальное количество посетителей, которые физически могут разместиться на экскурсионной тропе. В исследовании тропы заменены объектами гостеприимства, их емкость вычислена по данным табл. 2 и формуле 1:

$$F = A \cdot \frac{V}{a} \cdot R_f, \quad (1)$$

где  $A$  — площадь, доступная для общественного использования (в нашем случае число мест в объектах гостеприимства в дестинации),  $V/a$  — число посетителей ( $V$ ) на единицу площади ( $a$ ) (в нашем случае равно 1: один посетитель на одно место),  $R_f$  — фактор ротации.

Фактор ротации определяется по формуле:

$$R_f = \frac{\text{продолжительность сезона}}{\text{продолжительность сезона посещения}}. \quad (2)$$

При расчете фактора ротации принимается, что:

- летний и зимний сезон рассчитаны отдельно;
- продолжительность летнего сезона принята с 1 июня по 20 августа (81 день);
- в летний сезон сменяемость посетителей (кроме санаториев и курортов) происходит каждые 3 дня, 4-й день отводится на уборку номера (продолжительность смены 4 дня)  $R_f = 81/4$ ;
- к санаториям и курортам отнесены круглогодичные учреждения лечебно-профилактического профиля;
- продолжительность смены в санаториях и курортах составляет в среднем 10 дней на протяжении всего года,  $R_f = 364/10$ ;
- зимний сезон длится с 21 августа по 31 мая (284 дня);
- посещение объектов гостеприимства (кроме круглогодичных санаториев и курортов) в зимний сезон происходит только в 5 праздничных циклов, длящихся 3 дня и более (21 день в 2023 г.: 1 — 8 мая, 24 — 26 февраля, 29 апреля — 1 мая, 6 — 9 мая, 4 — 6 ноября),  $R_f = 21/5$ ;
- в зимний сезон номера заняты на протяжении всего праздничного цикла.

Ниже для примера дан расчет числа потребителей Алтайской дестинации. Количество круглогодичных санаторных мест равно 130 (см. табл. 1). Годовое количество посетителей может достигать:

$$F = 130 \cdot 1/1 \cdot 364/10 = 4732 \text{ чел/сут.}$$

Общее количество круглогодичных мест в объектах размещения равно 5296, а за минусом 130 санаторных — 5166. Летом посещаемость дестинации может достигнуть:

$$F = 5166 \cdot 1/1 \cdot 81/4 = 104612 \text{ чел/сут.}$$

Зимняя посещаемость составляет:

$$F = 5166 \cdot 1/1 \cdot 21/5 = 21697 \text{ чел/сут.}$$

Количество летних мест равно 1717, что соответствует посещаемости:

$$F = 1717 \cdot 1/1 \cdot 81/4 = 34769 \text{ чел/сут.}$$

Суммарная посещаемость дестинации при таких условиях составит 165810 чел/сут. Результаты расчетов с учетом уровня благоустройства гостевых мест в других дестинациях приведены в таблице 3.

Таблица 3

Годовое количество потребителей по элементам благоустройства, чел/сут

Annual number of consumers by elements of improvement, person/day

Дестинация	Общий душ		Душ во всех номерах		Ванная во всех номерах		Σ
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	
<i>Алтайский край</i>							
Алтайская	16292	95762	3457	3376	6007	19299	144193
Белокурихинская	10845	25880	7986	2430	118327	41408	206876

Окончание табл. 3

Дестинация	Общий душ		Душ во всех номерах		Ванная во всех номерах		Σ
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	
Егорьевская	0	26224	67	324	0	0	26615
Завьяловская	302	26669	160	4151	0	0	31282
Славгородская	0	11603	3037	11300	1697	12717	40354
Смоленская	1029	5873	168	810	403	2066	10349
Чарышская	88	1418	160	1418	0	0	3084
Чумышская	1302	7391	2045	10571	0	0	21309
<b>Σ</b>	<b>29858</b>	<b>200820</b>	<b>17080</b>	<b>34380</b>	<b>126434</b>	<b>75490</b>	<b>484062</b>
<i>Новосибирская область</i>							
Верхнеобская	34	162	420	2268	0	0	2884
Обское море	5051	30553	40403	52739	0	0	128746
Нижнеобская	7764	16909	28569	21636	0	0	74878
Бердская	55	1883	4192	7331	0	0	13461
Инская	3484	1337	84	405	0	0	5310
Чаны-Карачи	18496	17679	25525	26447	0	0	88147
<b>Σ</b>	<b>34884</b>	<b>68523</b>	<b>99193</b>	<b>110826</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>313426</b>

За объемную основу водопотребления принят показатель «общий расход воды потребителем в сутки» и нормативы показателя, установленные СП 30.13330.2016 «Внутренний водопровод и канализация зданий» для гостиниц, пансионатов и мотелей. Несмотря на свое назначение (для проектов внутренних систем водопроводов, что не обозначает фактической нагрузки на систему), свод правил ограничивает максимальный расход, который указывает на крайние значения возможных воздействий рекреационного комплекса.

По данным табл. 3 и нормам СП 30.13330.2016, рассчитан годовой объем водопотребления рекреационных объектов (табл. 4).

Таблица 4

Годовое водопотребление объектами гостеприимства, м<sup>3</sup>Annual water consumption by hospitality facilities, m<sup>3</sup>

Дестинация	Общий душ (норма 130 л/сут)		Душ во всех номерах (норма 150 л/сут)		Ванная во всех номерах (норма 200 л/сут)		Σ
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	
<i>Алтайский край</i>							
Алтайская	2118	12449	519	506	1201	3860	20653
Белокурихинская	1410	3364	1198	365	23665	8282	38284
Егорьевская	0	3409	10	49	0	0	3468
Завьяловская	39	3467	24	623	0	0	4153
Славгородская	0	1508	456	1695	339	2543	6541
Смоленская	134	764	25	122	81	413	1539
Чарышская	11	184	24	213	0	0	432

Дестинация	Общий душ (норма 130 л/сут)		Душ во всех номерах (норма 150 л/сут)		Ванная во всех номерах (норма 200 л/сут)		Σ
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	
Чумышская	169	961	307	1586	0	0	3023
Σ	3881	26106	2563	5159	25286	15098	78093
<i>Новосибирская область</i>							
Верхнеобская	4	21	63	340	0	0	428
Обское море	657	3972	6060	7911	0	0	18600
Нижнеобская	1009	2198	4285	3245	0	0	10737
Бердская	7	245	629	1100	0	0	1981
Инская	453	174	13	61	0	0	701
Чаны-Карачи	2405	2298	3829	3967	0	0	12499
Σ	4535	8908	14879	16624	0	0	44946

Таким образом, методический подход, включающий способ получения исходной информации и комплекс расчетных операций, позволяет получить данные о гипотетической посещаемости объектов гостеприимства и объеме их рекреационного водопотребления. При наличии детальных знаний, например, о поступлении химических и микробиологических загрязнителей в рекреационные воды (в течение десятиминутного купания с тела одного человека в воду смывается свыше 3 млрд. сапрофитовых бактерий, от 100 тыс. до 20 млн. кишечных палочек; при одноразовом выделении продуктов жизнедеятельности в воду — 2,3 г. хлора, 0,55 г. оксида фосфора, 0,136 г. аммиака, 0,073 г. мочевой кислоты, 5,5 г. мочевины, 45,5 г. аминокислот, 0,021—0,051 г. фенолов, сульфатов и других веществ, по [7 — 13]), подход призван опережать прикладные отраслевые вычисления.

### Результаты исследований

Результаты расчетов стали исходной информацией для анализа рекреационного водопользования и его последствий для окружающей среды на юге Сибири. В частности, получены данные о числе водопользователей, которых способны принять объекты размещения в течение года при максимальной загрузке. Фактическое количество гостей в данном случае не столь существенно, поскольку не обеспечено надежной статистикой и редко превышает номерные мощности рекреационных учреждений.

Кроме того, данные о гипотетическом объеме водопотребления (водоотведения) позволили сравнить регионы между собой и дестинации внутри них в контексте пространства и времени (рис. 1—3).

Текущая ситуация в рассмотренных регионах характеризуется преобладанием объектов гостеприимства в дестинациях более южного региона — Алтайского края (70,4 %). Более 64 % от общего количества гостевых мест также приходится на Алтайский край. Сопоставимые пропорции описывают распределение круглогодичных (63,8 % в Алтайском крае и 36,2% в Новосибирской области) и летних



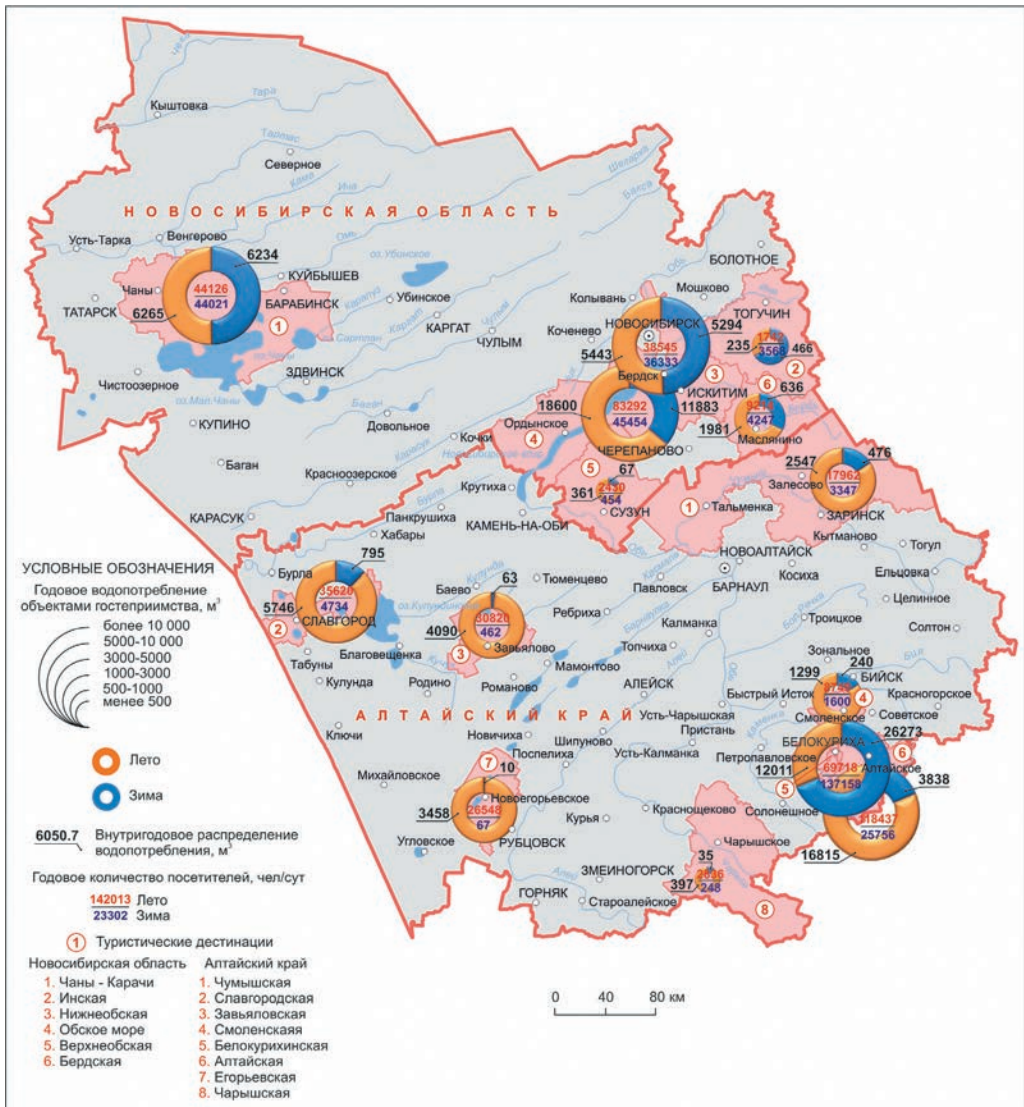


Рис. 1. Рекреационное водопотребление в туристических дестинациях Алтайского края и Новосибирской области.

Fig. 1. Recreational water consumption in tourist destinations in Altai Krai and Novosibirsk Oblast.

(соответственно 65,5 % и 34,5 %) мест. Соотношение доли постоянного населения регионов имеет обратный вид: 56,7 % — Новосибирская область, 43,3 % — Алтайский край.

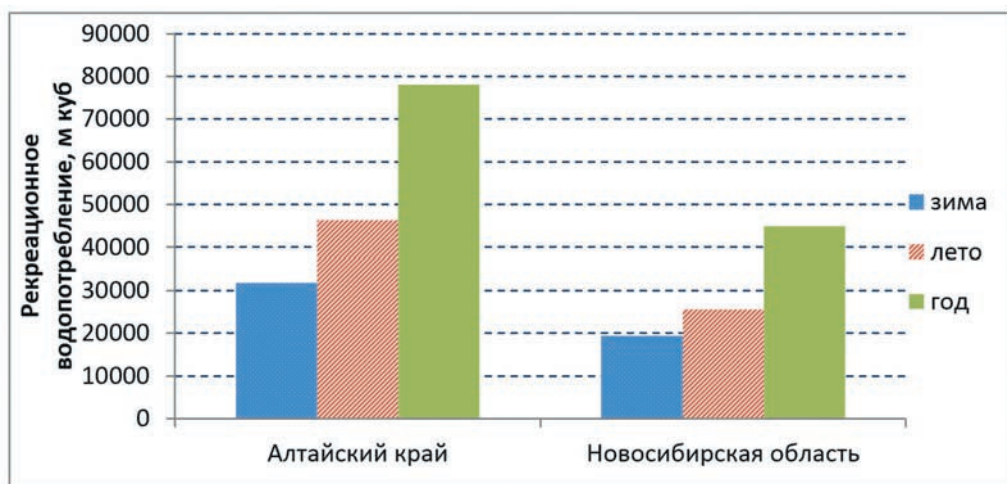


Рис. 2. Внутригодовое распределение рекреационного водопотребления в Алтайском крае и Новосибирской области.

Fig. 2. Intra-annual distribution of recreational water consumption of Altai region and Novosibirsk oblast.

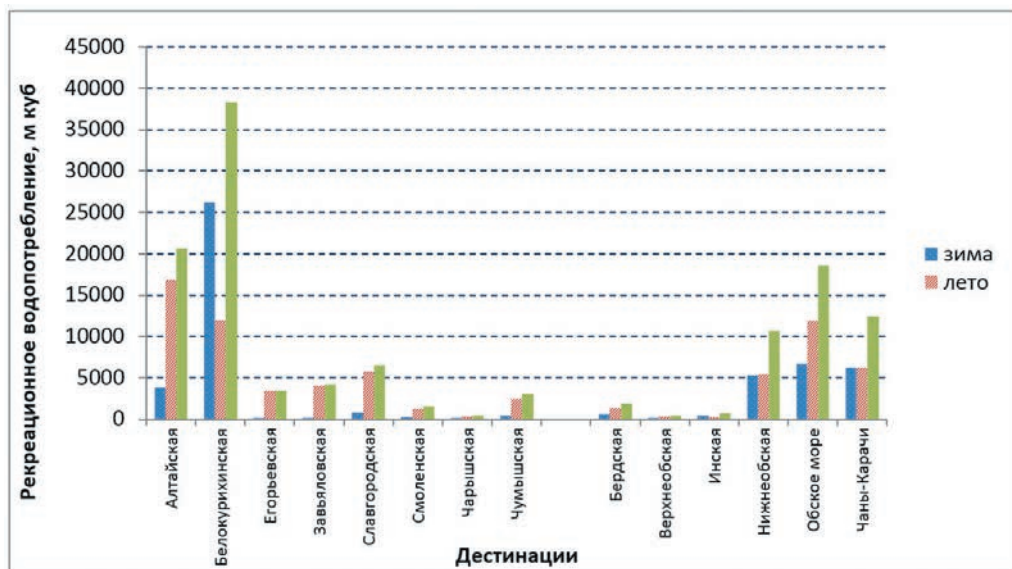


Рис. 3. Доля туристских дестинаций в рекреационном водопотреблении.

Fig. 3. Share of tourist destinations in recreational water consumption.

Уровень благоустройства, определяемый наличием различных водопотребляющих устройств, в регионах различен. Так, в Алтайском крае половина мест (50,1 %) сосредоточена в номерах с общим душем, 37,6 % — в номерах с ванной. В Новосибирской области душем оборудованы 69,1 % мест, а посетители 30,6 % мест пользуются одним душем на несколько номеров или на территории.

Сезонные и коммуникационные особенности туристско-рекреационной инфраструктуры отразились на итоговом водопотреблении. Так, соотношение между отраслевым водопотреблением Новосибирской области и Алтайского края может достигать 1:1,7, в то время как соотношение количества потребителей ресурса соответственно равно 1,5:1.

К особенностям водопотребления в обоих регионах относится преимущественно летний характер отдыха, поэтому в подавляющем большинстве направлений летнее водопотребление превалирует над зимним: 56,8 % и 43,2 % в Новосибирской области, 59,4 % и 40,6 % в Алтайском крае. В Алтайском крае зимой доминирующими водопользователями с совокупным зимним водопотреблением 94,9 % являются санатории города-курорта Белокурихи (82,8 %) и объекты Алтайской дестинации (12,1 %), среди которых учреждения особой экономической зоны туристско-рекреационного типа «Бирюзовая Катунь» и игровой зоны «Сибирская монета». В Новосибирской области 92,2 % зимнего водопотребления приходится Нижнеобскую (27,3 %), Обское море (34,6 %), Чаны-Карачи (32,1 %) дестинации. Эти же дестинации формируют преимущество в летнем водопотреблении.

Данные о специфике и количестве рекреационных загрязнителей позволили вычислить количество химических веществ и микробов, попадающих в сточные воды и далее — окружающую среду (табл. 5). Количество кишечных палочек и масса фенолов приведены по нижней границе интервала, что показывает минимально неизбежный уровень возможных загрязнений.

Таблица 5

Годовое поступление химических и микробиологических загрязнителей  
в рекреационные воды

Intake of chemical and microbiological pollutants into recreational waters per year

Дестинация	Сапфитовые бактерии, ед	*Кишечные палочки, ед	Хлор, кг	Оксид фосфора, кг	Аммиак, кг	Мочевая кислота, кг	Мочевина, кг	Аминокислоты, кг	*Фенолы, сульфаты и др. вещества, кг
<i>Алтайский край</i>									
Алтайская	432,6·10 <sup>12</sup>	14,4·10 <sup>9</sup>	331,6	79,3	19,6	10,5	793,1	6560,8	3,0
Белокурихинская	620,6·10 <sup>12</sup>	20,7·10 <sup>9</sup>	475,8	113,8	28,1	15,1	1137,8	9412,9	4,3
Егорьевская	79,9·10 <sup>12</sup>	2,7·10 <sup>9</sup>	61,2	14,6	3,6	1,9	146,4	1211,0	0,6
Завьяловская	93,9·10 <sup>12</sup>	3,1·10 <sup>9</sup>	72,0	17,2	4,3	2,3	172,1	1423,3	0,7
Славгородская	121,1·10 <sup>12</sup>	4,0·10 <sup>9</sup>	92,8	22,2	5,5	3,0	222,0	1836,1	0,9
Смоленская	31,1·10 <sup>12</sup>	1,0·10 <sup>9</sup>	23,8	5,7	1,4	0,8	56,9	470,9	0,2

Дестинация	Сапритовые бактерии, ед	*Кишечные палочки, ед	Хлор, кг	Оксид фосфора, кг	Аммиак, кг	Мочевая кислота, кг	Мочевина, кг	Аминокислоты, кг	*Фенолы, сульфаты и др. вещества, кг
Чарышская	9,3·10 <sup>12</sup>	0,3·10 <sup>9</sup>	7,1	1,7	0,4	0,2	17,0	140,3	0,1
Чумышская	63,9·10 <sup>12</sup>	2,1·10 <sup>9</sup>	49,0	11,7	2,9	1,6	117,2	969,6	0,5
Σ	1,5·10 <sup>15</sup>	48,4·10 <sup>9</sup>	1113,3	266,2	65,8	35,4	2662,5	22024,9	10,3
<i>Новосибирская область</i>									
Верхнеобская	8,7·10 <sup>12</sup>	0,3·10 <sup>9</sup>	6,6	1,6	0,4	0,2	15,9	131,2	0,1
Обское море	386,2·10 <sup>12</sup>	12,9·10 <sup>9</sup>	296,1	70,8	17,5	9,4	708,1	5857,9	2,7
Нижнеобская	224,6·10 <sup>12</sup>	7,5·10 <sup>9</sup>	172,2	41,2	10,2	5,5	411,8	3407,0	1,6
Бердская	40,4·10 <sup>12</sup>	1,4·10 <sup>9</sup>	31,0	7,4	1,8	1,0	74,0	612,5	0,3
Инская	15,9·10 <sup>12</sup>	0,5·10 <sup>9</sup>	12,2	2,9	0,7	0,4	29,2	241,6	0,1
Чаны-Карачи	264,4·10 <sup>12</sup>	8,8·10 <sup>9</sup>	202,7	48,5	12,0	6,4	484,8	4010,7	1,9
Σ	0,3·10 <sup>15</sup>	31,3·10 <sup>9</sup>	720,8	172,4	42,6	22,9	1723,8	14260,9	6,7

Поскольку количество привносимых рекреацией загрязнений напрямую зависит от количества пользователей воды, то имеет те же пространственные и временные особенности, что и общее рекреационное водопотребление. Однако дополнительно результаты анализа демонстрируют и порядок цифр, что приводит к выводу о рекреации как о значимом источнике внешних загрязнений природных водоемов.

### Заключение

Информация о сфере рекреационного водопользования по широкому спектру вопросов: от количества потребителей ресурса до точечных элементных воздействий на окружающую среду, — обычно остается крайне скудной. Дело не только и не столько в закрытости сведений, сколько в отсутствии понимания о способах их получения. Примененный в исследовании методический подход, объединяющий положения разных областей науки и практики, позволил расчетным путем получить данные о водопотреблении в туристических дестинациях Алтайского края и Новосибирской области, а также произвести необходимые прикладные вычисления. Для территорий, планомерно развивающих региональный туризм, полученные результаты имеют выраженное практическое значение.

На основе инвентаризационных данных, нормативов водопотребления и их совместной интерпретационной оценки получены крайние значения важнейших показателей отрасли: количество водопотребителей, объем прямого водопотребления и количество производимых загрязнений. Крайние значения ограничивают максимально возможный или минимально неизбежный уровень показателя, что позволяет рассчитывать количество требуемого ресурса, контролировать сброс отработанных вод и поступление антропогенных загрязнителей в окружающую среду.

Значимость проведенных расчетов для модельных районов состоит в поддержке управленческих решений в области повышения уровня экологической безопасности. Располагаясь в местностях с особыми условиями природопользования (на ООПТ или сопредельно с ними), развивающих природоориентированные виды туризма (экологический, медицинский, сельский, лечебно-оздоровительный, культурно-познавательный, детский, событийный и активный) и зачастую лишенных централизованных очистных сооружений и коллекторов, рассмотренные дестинации получают инструмент для опережающих расчетов водопотребления, что, в свою очередь, позволяет определить меры по минимизации ресурсопотребления и производимых воздействий.

### Список литературы

1. Авакян А. Б., Бойченко В. К., Ланцова И. В. и др. Рекреационное использование водохранилищ: проблемы и решения. М.: Наука, 1990. 152 с.
2. Архипова И. В., Андреева И. В., Циликina С. В. Оценка водопотребления и рекреационной нагрузки водозависимых рекреационных практик на Телецком озере // Известия АО РГО. 2021. №3. С. 5—19. DOI: 10.24412/2410-1192-2021-16201.
3. Косманев А. Л. Туристская инфраструктура в региональных исследованиях // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. 2012. №2. С. 5—12.
4. Зырянов А. И. Профильные туристские дестинации // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62. Вып. 3. С. 254—265.
5. Ceballos-Lascurain H. Tourism, ecotourism and protected areas. IUCN, 1996. 248 p.
6. Arias M. C. Determinacion de capacidad de carga turistica en areas protegidas. CATIE, Turrialba, 1992. 134 p.
7. Чекмарева Е. А. Купание как вид рекреационного водопользования водоемов ЦФО России // Успехи современного естествознания. 2019. № 4. С. 87—92.
8. Григорьева И. Л., Чекмарева Е. А. Влияние рекреационного водопользования на качество воды Ивановского водохранилища // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 3. С. 63—70.
9. Соловьева Т. А. Купание как причина загрязнения воды // Гигиена и санитария. 1953. № 3. С. 55—58.
10. Ланцова И. В. Рекреационное водопользование как фактор формирования качества воды // Вода: Химия и экология. 2009. № 2. С. 2—7.
11. Андреева И. В. Опасности и риски рекреационного водопользования: векторы международных исследований. Качество рекреационных сред // Водные ресурсы. 2021. Том 48. №3. С. 280—289. DOI: 10.31857/S0321059621030032
12. Андреева И. В., Пузанов А. В. Опасности и риски рекреационного водопользования: векторы международных исследований. Воздействия рекреации на экосистемы и биоту // Водные ресурсы. 2022. Том 49. №1. С. 112—120. DOI: 10.31857/S0321059622010023.
13. Андреева И. В., Циликina С. В., Архипова И. В. Рекреационное водопользование и рекреационное водопотребление / Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием: в 3 т. Барнаул, 2022. Т. 3. С. 3—8.

### References

1. Avakyan A. B., Boychenko V. K., Lancova I. V. et al. *Rekreacionnoe ispolzovanie vodohranilishch: problemy i resheniya = Recreational use of reservoirs: problems and solutions*. Moscow: Nauka, 1990: 152 p. (In Russ.).
2. Arhipova I. V., Andreeva I. V., Tsilikina S. V. Assessment of water consumption and recreational load of water-dependent recreational practices on Lake Teletskoye. *Izvestiya AO RGO = Izvestia of JSC RGS*. 2021; 3: (5—19). (In Russ.).



3. Kosmanev A. L. Tourist infrastructure in regional studies. *Vestnik VGU, Seriya: Geografiya. Geokologiya = VSU Bulletin, Series: Geography. Geecology*. 2012; 2: (5—12). (In Russ.).
4. Zyryanov A. I. Profile tourist destinations. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg State University. Geosciences*. 2017; 62(3): (254—265). (In Russ.).
5. Ceballos-Lascurain H. Tourism, ecotourism and protected areas. IUCN, 1996: 248 p.
6. Arias M. C. Determinacion de capacidad de carga turistica en areas protegidas. CATIE, Turrialba, 1992: 134 p. (In Russ.).
7. Chekmareva E. A. Swimming as a type of recreational water use of water bodies in the Central Federal District of Russia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances of modern natural science*. 2019; 4: (87—92). (In Russ.).
8. Grigor'eva I. L., Chekmareva E. A. The influence of recreational water use on the water quality of the Ivankovo Reservoir. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*. 2013; 3: (63—70). (In Russ.).
9. Solov'eva T. A. Swimming as a cause of water pollution. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 1953; 3: (55—58). (In Russ.).
10. Lancova I. V. Recreational water use as a factor in shaping water quality. *Voda: Himiya i ekologiya = Water: Chemistry and ecology*. 2009; 2: (2—7). (In Russ.).
11. Andreeva I. V. Dangers and risks of recreational water use: vectors of international research. Quality of recreational environments. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; 48(3): (280—289). (In Russ.).
12. Andreeva I. V., Puzanov A. V. Dangers and risks of recreational water use: vectors of international research. Impact of recreation on ecosystems and biota. *Vodnye resursy = Water resources*. 2022; 49(1): (112—120). (In Russ.).
13. Andreeva I. V., Cilikina S. V., Arhipova I. V. Recreational water use and recreational water consumption. *Materialy IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Materials of the IV All-Russian scientific conference with international participation*. Barnaul. 2022; 3: (3—8). (In Russ.).

### **Сведения об авторах**

*Ирина Владимировна Андреева*, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), direction-altai@yandex.ru.

*Ирина Владимировна Архипова*, кандидат географических наук, научный сотрудник, ФГБУ «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), rgo.alt\_22@inbox.ru.

*Светлана Владимировна Циликina*, технолог, ФГБУ «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), sv.cilikina@mail.ru.

### **Information about authors**

*Irina V. Andreeva*, candidate of geographical sciences, senior researcher, Institute for water and environmental problems SB RAS.

*Irina V. Arkhipova*, candidate of geographical sciences, researcher, Institute for water and environmental problems SB RAS.

*Svetlana V. Teilikina*, technologist, Institute for water and environmental problems SB RAS.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 06.09.2023*

*Принята к печати после доработки 12.02.2024*

*The article was received on 06.09.2023*

*The article was accepted after revision on 12.02.2024*



***ИСТОРИЯ. ХРОНИКА. ПЕРСОНАЛИИ******STORY. CHRONICLE. PERSONALIES***

УДК [061.1+061.3]:001

**Восьмидесятилетний юбилей Института озераведения  
и Всероссийская научная конференция «Лимнология  
в России» (г. Санкт-Петербург, 12—14 февраля 2024 г.)*****Сергей Алексеевич Кондратьев***

Институт озераведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН),  
Санкт-Петербург, Россия, 3718470@gmail.com

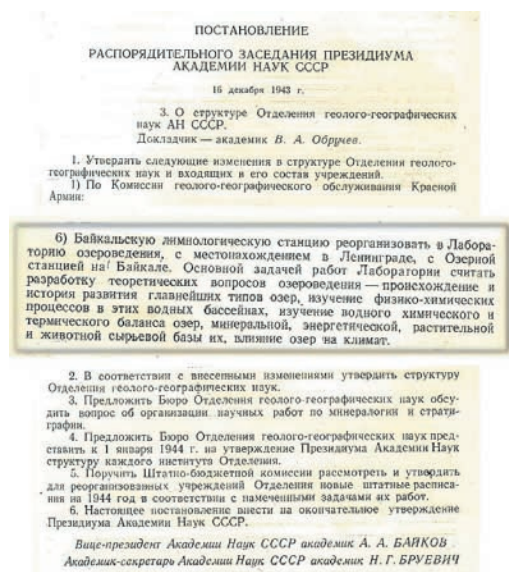
*Аннотация.* Представлена история развития Института озераведения с даты образования (16 декабря 1943 г.) по настоящее время. Восьмидесятилетию Института озераведения посвящена Всероссийская научная конференция «Лимнология в России», состоявшаяся в г. Санкт-Петербурге 12—14 февраля 2024 г. Современная тематика исследований ИНОЗ РАН определила основные направления работы Конференции.

*Ключевые слова:* Институт озераведения, Санкт-Петербург, конференция, лимнология.

16 декабря 1943 года Президиум АН СССР принял решение организовать в блокадном Ленинграде Лабораторию озераведения в составе Отделения Геолого-географических наук АН СССР с целью разработки «теоретических вопросов озераведения — происхождение и история развития главнейших типов озер, изучение физико-химических процессов в этих водных бассейнах, изучение водного химического и термического баланса озер, минеральной, энергетической, растительной и животной сырьевой базы их, влияния озер на климат» (рис. 1 а). 9 февраля 1944 года это решение вступило в силу, именно от этой даты ИНОЗ отсчитывает годы своей истории.

Решение об основании Лаборатории озераведения в Ленинграде было принято по инициативе крупнейшего ученого-лимнолога Глеба Юрьевича Верещагина, который являлся и ее первым директором, но, к сожалению, он скончался в том же 1944 г. До 1945 г. лабораторией руководил академик Николай Михайлович Страхов, а с 1946 г. по 1955 г. директором являлся академик Дмитрий Васильевич Наливкин. Первоначально лаборатория основывалась на финансовых ресурсах и штатах Байкальской лимнологической станции, организованной еще в 1928 г., а располагалась — на хорах Русского географического общества. К 1949 г. Лаборатория озераведения сформировалась как центральное научное учреждение с лимнологической станцией на озере Пуннус-ярви (Красное) на Карельском перешейке. В 1950 г. начали издаваться труды Лаборатории озераведения, и это продолжалось до 1968 г. В 1955 г. директором назначен академик Станислав Викентьевич Колесник. В 1971 г. лаборатория была преобразована в Институт озераведения (рис. 1 б). В последующие годы ИНОЗ возглавляли выдающиеся ученые:

а)



б)

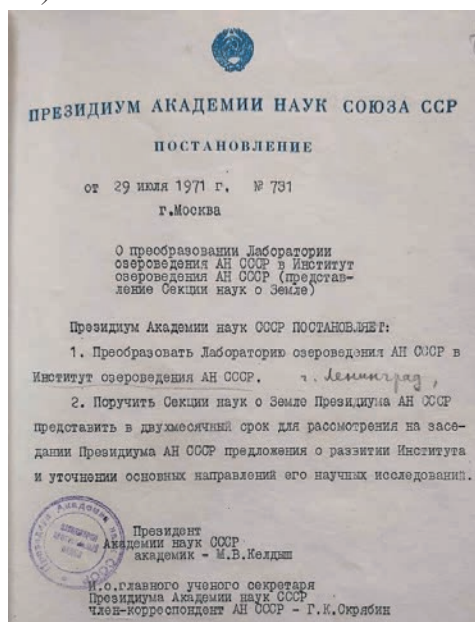


Рис. 1. Постановления президиума АН СССР об организации Лаборатории озероведения (а) и о преобразовании её в Институт озероведения (б)

член-корреспондент АН СССР Олег Александрович Алекин, академики Алексей Федорович Трешников, Владислав Александрович Румянцев, доктор географических наук Шамиль Рауфович Поздняков. В декабре 2019 г. Институт озероведения введен в состав СПб ФИЦ РАН в качестве обособленного структурного подразделения, директор которого — кандидат биологических наук Оксана Ярославовна Глибко.

Лаборатория, а затем Институт озероведения проводили исследования на озерах и водохранилищах практически всех регионов бывшего Советского Союза: Камчатки, Сахалина, Дальнего Востока, Казахстана, Памира, Тянь-Шаня, Урала, Кольского полуострова, Таймыра, Европейской территории России, Армении, Белоруссии, Латвии, Эстонии, Украины, а также Арктики и Антарктики. Совместно с зарубежными специалистами выполнялись научные исследования в Финляндии, Швеции, Турции, Германии, Польше, Болгарии, Венгрии, Эстонии, Чехии, Словакии, Монголии, Канаде, США и др. Научные исследования ИНОЗ РАН носят комплексный характер: теоретические, экспериментальные (лабораторные и полевые), методические исследования и региональные научно-исследовательские работы по изучению пространственно-временных закономерностей функционирования озерных экосистем и их эволюции их под влиянием природных и антропогенных факторов. Институт озероведения по праву гордится своей славной историей и результатами научных исследований.



Рис. 2. Динамика численности сотрудников Лаборатории / Института озераедения.

На рис. 2 представлена динамика общей численности сотрудников и вспомогательного персонала Лаборатории / Института озераедения за период с 1946 г. по настоящее время. Очевидны тренды, характерные для периода АН СССР, когда научный прогресс был в приоритете, и для периода РАН, когда доминировала тенденция сокращения финансирования научных исследований.

Восьмидесятилетие Института озераедения посвящена Всероссийская научная конференция «Лимнология в России», состоявшаяся в г. Санкт-Петербурге 12—14 февраля 2024 г. Организаторами Конференции стали Институт озераедения РАН, Отделение наук о Земле РАН и Русское географическое общество. Данное мероприятие соответствует задачам «Десятилетия науки и технологий 2022—2031».

Конференцию открыла д.г.н., член-корреспондент РАН, директор Института географии РАН О.Н. Соломина. С приветственными словами к участникам Конференции обратились к.г.н., заместитель академика-секретаря ОНЗ РАН по научно-организационной работе И. Н. Сократова, председатель Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга А. В. Герман, зам. министра природных ресурсов и экологии Республики Карелия П. М. Николаевский, д.г.н., проф. член-корр. РАН Н. Н. Филатов, д.г.-м.н., директор Лимнологического института СО РАН А. П. Федотов, д.г.н., директор Института исследований континентальных водных объектов РГГМУ Ш. Р. Поздняков, к.б.н., руководитель Санкт-Петербургского филиала ФГБНУ ВНИРО («ГосНИОРХ») им. Л. С. Берга М. М. Мельник, д.г.-м.н., и.о. директора НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН А.А. Тронин, к.г.н., директор ГГИ С. А. Журавлев, д.т.н., проф. РАН, и.о. директора СПб ФИЦ РАН А. Л. Ронжин. Также приветствия участникам Конференции и поздравления с юбилеем Института

озероведения прислали Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Департамент координации деятельности научных организаций Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Комитет по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Современная тематика исследований ИНОЗ РАН определила основные направления работы Конференции. Были представлены устные и стендовые доклады по актуальным направлениям, объединенным в следующие секции:

- Общие проблемы лимнологии и прикладные исследования;
- Гидробиологические и ихтиологические исследования озер;
- Химия воды и донных отложений озер;
- Палеолимнологические исследования;
- Современные изменения климата и гидрологические процессы в крупных озерах;

— Моделирование гидрологических и биогеохимических процессов в озерах.

На Конференции было представлено 124 доклада, в том числе 91 очный доклад, 9 дистанционных и 24 стендовых доклада. 71 доклад был представлен сотрудниками институтов РАН, 25 — сотрудниками различных университетов. Общее число участников составило более 200 человек. География участников: 18 городов и 48 научных и образовательных учреждений, органов государственной власти Российской Федерации и субъектов Российской Федерации, а также Республики Беларусь.

Пленарное заседание проходило 12 февраля в здании Санкт-Петербургского отделения Русского географического общества (рис. 3—5). На нем было заслушано и обсуждено 12 докладов. В докладах Н. Н. Филатова и С. А. Кондратьева



Рис. 3. Открытие Конференции «Лимнология в России» (Русское географическое общество, 12 февраля 2024 г.).



представлены основные этапы восьмидесятилетней истории Лаборатории, а затем Института озераведения. История многолетнего сотрудничества ИНОЗ и лимнологов Белорусского и Вологодского университетов рассмотрены в докладах Б. П. Власова и Н. Л. Болотовой. О. Н. Соломина посвятила свое выступление результатам изучения зависимости динамики ледников от климатических изменений за последние 2 тыс. лет, выявленной на основе анализа озерных осадков. Обзор современного состояния лимнологических исследований озера Байкал и перспективы их новых направлений представил А. П. Федотов. О палеолимнологических аспектах исследований в нашей стране говорил В. Д. Страховенко. Результаты совместных исследований ИАЭП и ИНОЗ в области моделирования внешней биогенной нагрузки на водные объекты рассмотрены в докладе А. Ю. Брюханова. М. А. Науменко изложил вопросы, связанные с прогрессом в области исследований возможных изменений термической структуры Ладожского озера под влиянием климатических воздействий. Перспективы внедрения альгицидов нового поколения в практику реабилитации и защиты водоемов от цианобактериального «цветения» представлены в докладе Е. А. Курашова. Аспекты дистанционной оценки характеристик неизученных озер арктической зоны Российской Федерации осветил С. А. Кондратьев. В докладе Ш. Р. Позднякова нашли отражение существующие проблемы, связанные с воздействием наночастиц на функционирование лимнических систем.

Секционные заседания в очно-дистанционном формате проходили 13—14 февраля в здании Института озераведения РАН.



Рис. 4. Пленарный доклад директора Лимнологического института СО РАН д.г.-м.н. А. П. Федотова.



Рис. 5. Участники Конференции на парадной лестнице Русского географического общества.

Более подробная информация об истории Лаборатории / Института озераведения, а также об основных направлениях его современных исследований содержится в монографии «80 лет развития лимнологии в Институте озераведения Российской академии наук» под ред. С. А. Кондратьева (рис. 6 а). Поступившие на конференцию материалы опубликованы в сборнике тезисов докладов Всероссийской научной конференции «Лимнология в России» (рис.6 б).

По итогам пленарных и секционных заседаний, а также дискуссий Конференция рекомендует:

— Одобрить в целом результаты конференции, отметить её актуальность и научно-практическую направленность.

— Рекомендовать результаты научных исследований, представленных в 32 докладах, к публикации в научных журналах «Лимнология и океанология. Труды КарНЦ», «Гидрометеорология и экология», а также *Limnology and Freshwater Biology*.

— Активизировать на разных уровнях проведение научных исследований по вопросам комплексного изучения водных объектов и их водосборов с целью совершенствования подходов к охране и научно-обоснованному рациональному использованию водных ресурсов, в том числе (исследовать гидрологические аспекты трансформации вещества и энергии в разнотипных водных объектах





Рис. 6. Монография «80 лет развития лимнологии в Институте озероведения Российской Академии наук» (а) и тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Лимнология в России» (б).

в условиях изменяющегося климата; разработать теорию эволюции, функционирования, устойчивости и восстановления озер в различных географических зонах; провести оценку природно-ресурсного потенциала озерного фонда России с прогнозом тенденций его изменения с учетом социально-экономического развития регионов; продолжить развитие палеолимонологических исследований, по результатам которых восстановить выпуск серии монографий «История озер», продолжить разработку рекомендаций по принятию мер, направленных на сохранение Онежского и Ладожского озер как уникальных природных объектов и крупнейших пресноводных озер в Европе).

— Обратить внимание на необходимость совершенствования подготовки специалистов по направлениям лимнология, гидрофизика, гидрохимия, гидробиология с учётом современных тенденций развития цифровой экономики.

— Признать необходимым более активное вовлечение в научно-исследовательскую деятельность молодых исследователей (студентов, магистрантов, аспирантов, начинающих педагогов).

— Руководителям институтов лимнологического профиля (ИНОЗ РАН, ИВПС КарНЦ РАН, ЛИН СО РАН, ИБВВ РАН, Института географии РАН и др.) подготовить обращение в ВАК РФ и Минобрнауки с целью определения специальности «лимнология» для защиты диссертаций на соискание ученой степени

кандидата (доктора) географических наук, а также формирования соответствующих кафедр и специальностей в университетах и вузах России.

***Информация об авторе***

*Сергей Алексеевич Кондратьев*, д.ф.-м.н., гл.н.с., руководитель лаборатории математических методов моделирования Института озероведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), 3718470@gmail.com.

Обзорная статья

УДК 51:378.147

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-143-152

## **Роль математики в обучении студентов РГГМУ**

***Галина Иосифовна Беликова, Екатерина Анатольевна Бровкина,  
Ирина Владимировна Зайцева, Вера Валерьевна Петрова,  
Сергей Николаевич Фадеев***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
galabel45@gmail.com.

*Аннотация.* Математика в РГГМУ является одной из важнейших дисциплин. В данной статье подробно проанализирована роль преподавателей-математиков в процессе обучения студентов университета. Уделено внимание математическому моделированию и вычислительной математике, представлен эксперимент, связанный со студенческими докладами по истории Российской математической школы. Такой цикл докладов положительно влияет на процесс воспитания чувства патриотизма у молодого поколения и повышает у студентов интерес к математике.

*Ключевые слова:* высшая математика, математическое моделирование, вычислительная математика, прогноз опасных явлений, математическая статистика, история.

## **The role of mathematics in teaching students RSHU**

***Galina I. Belikova, Ekaterina A. Brovkina, Irina V. Zaitseva,  
Vera V. Petrova, Sergey N. Fadeev***

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, galabel45@gmail.com

*Summary.* Mathematics is extremely important part in general system of higher education in our university. One may say, that present hydrometeorology is physics, mathematics and strong computer. Role of mathematics becomes more significance thanks to continuous developing of mathematical modeling. That is why a mathematical professor must teach his students at a more high level. Attention is paid to mathematical modeling. It has long been successfully used to describe processes, occurring in the atmosphere and oceans; used to forecast various phenomena, including dangerous and especially dangerous phenomena. Various methods of approximation theory and mathematical statistics are widely used in the analysis of hydrometeorological observation series. There is described the experience, associated with student presentation reports on the history of the development of the Russian mathematical school in the end of the article. Such series of reports has a positive effect on the process of instilling a sense of patriotism in the young and increases students' interest in mathematics.

*Keywords:* higher mathematics, mathematical modeling, prediction of dangerous phenomena, series of observations, mathematical statistics, history.

### **Введение**

*Структура мироздания основана на математике.*

*Архимед*

В нашем университете всегда уделялось большое внимание процессу преподавания высшей математики, что неудивительно. Ещё Галилей говорил: «Великая

книга природы может быть прочитана только теми, кто знает язык, на котором она написана, а этот язык — математика». Значение математики прекрасно понимал и Р. Декарт — знаменитый французский математик и философ XVII века. Он много и плодотворно изучал причины образования облаков, дождя, грома, молнии, радуги и впервые представил метеорологию с научной точки зрения, используя при этом математику.

На протяжении многих лет кафедра математики пользовалась большим авторитетом у студентов и всего преподавательского состава. Среди выпускников были студенты, которые дополнительно учились на математико-механическом факультете ЛГУ и получили диплом математика. Например:

- метеоролог Русин И. Н., профессор, д-р физ.-мат. наук;
- метеоролог Неёлова Л. О., доцент, канд. физ.-мат. наук;
- гидролог Саноцкая Н. А., доцент, канд. физ.-мат. наук;
- океанолог Веретенников В. Н., профессор, канд. физ.-мат. наук;
- океанолог Сычев В. И. доцент, канд. физ.-мат. наук;
- метеоролог Савченко В. Г., д-р физ.-мат. наук.

Кафедре всегда были свойственны профессионализм и доброжелательность. Большинство преподавателей кафедры — выпускники матмеха ЛГУ. Огромным авторитетом во второй половине XX в. пользовался И. С. Понизовский — безупречный преподаватель, любимец всех студентов. Сферой его научных интересов была высшая алгебра, по которой он защитил докторскую диссертацию. И. С. Понизовский был редактором международного научного журнала по высшей алгебре и участником ряда международных алгебраических конференций, одну из которых он организовал и провёл в Гидромете. Интересно отметить, что в юности он жил в блокадном Ленинграде и учился в то страшное время в знаменитой 206-й школе [1]. И. Я. Ашнивец была прекрасным преподавателем, удивительно светлым и красивым человеком. До Гидромета она работала на матмехе в ЛГУ. И. Я. Ашнивец рассказывала, что её предками были шведы. Они жили в нашем городе со времён его основания [1]. Последние годы на кафедре работал кандидат физ.-мат. наук, доцент В. Г. Никитенко — один из авторов современного учебника по теории вероятностей [2].

Есть несколько выпускников Гидромета, из которых кафедра математики воспитала преподавателей высшей математики. В. Н. Веретенников на протяжении многих лет успешно возглавлял кафедру и был отличным преподавателем. Его ученица Н. А. Саноцкая — доцент кафедры гидрометрии, автор спецкурса по теории вероятностей и математической статистике.

До конца XX в. кафедра математики тесно взаимодействовала со специальными кафедрами, благодаря чему происходило дальнейшее развитие курсов лекций по различным разделам высшей математики: математической физики, вычислительной математики, теории вероятностей, математической статистики и функционального анализа.

Специалисты в области теории вероятностей и математической статистики — доценты Д. И. Казакевич и В. С. Ершова — занимались научной работой в институте «Авиационной метеорологии» под руководством доктора физ.-мат.

наук, профессора С.В. Солонина. К. И. Кудрявая разрабатывала морские прогнозы с помощью теории вероятностей и математической статистики. Ю. Л. Матвеев и Г. И. Беликова участвовали в математических расчётах, связанных с проблемами спутниковой метеорологии, динамики облаков и т.д.

В разные периоды на кафедре преподавали приглашённые математики. Одним из них был доктор физ.-мат. наук Б. Г. Вагер — автор трёх монографий по математическому моделированию и применению методов вычислительной математики в гидрометеорологии, написавший более 120 учебных пособий. Среди них наиболее популярны «Сплайны и метод конечных разностей при решении прикладных задач» и «Введение в прикладную математику». Он был ответственным редактором межвузовского тематического сборника трудов «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В одном из выпусков этого сборника [3] есть статья математиков нашей кафедры. Б. Г. Вагер был заслуженным работником высшей школы РФ и членом президиума научно-методического совета по математике вузов Северо-Запада. Он увлекался шахматами, был мастером ФИДЕ, участником первенств РФ по шахматам среди ветеранов и командных первенств Европы.

Другим совместителем был доктор физ.-мат. наук, ведущий в России специалист по атмосферному электричеству, написавший монографию по данной тематике, В. Н. Морозов [4].

Коллектив кафедры занимался подготовкой учебных пособий по высшей математике и специальным главам высшей математики: К. И. Кудрявая «Теория вероятностей», «Задачник по теории вероятностей и математической статистике»; Д. И. Казакевич «Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии» и т. д. В настоящее время математики кафедры активно занимаются подготовкой учебных пособий.

На метеорологическом факультете лекции читал учёный-математик Л. С. Гандин. Известна его монография, посвященная оптимальной интерполяции метеорологических полей. На кафедре метеопрогнозов работала В. Д. Еникеева — специалист в области теории вероятностей и математической статистики, канд. физ.-мат. наук, доцент, соавтор учебника «Авиационная метеорология».

В настоящее время сменилось название кафедры. Сократился объём лекционных часов и количество практических занятий. Несмотря на это, преподаватели-математики кафедры открывают студентам удивительный мир этой прекрасной науки, приобщают их к тем разделам математики, которые широко используются в гидрометеорологии и экологии.

### **Математическое моделирование в гидрометеорологии и экологии**

Часть студентов, поступая в наш университет, уверены, что в РГТМУ основной предмет — география, которая никак не связана с математикой. Убедить их в обратном удаётся только с помощью исторических фактов. Студенты с удивлением узнают на занятиях по математике, что в основе развития картографии лежат работы великих математиков.

В XVIII в. необходимо было создать наиболее точные географические карты всей территории России. Для этого образовали группу из геодезистов, чертёжников и математиков. Работая в этой группе, великий Л. Эйлер руководил математическими и картографическими работами и сам занимался черчением карт. В 1745 г. появился «Атлас России». Эйлер писал: «Я уверен, что география российская через наши труды приведена в гораздо исправнейшее состояние, чем география немецкой земли» [5].

В работе «О построении географических карт» выдающийся русский математик П. Л. Чебышев представил метод построения такой проекции, при которой искажение масштаба уменьшалось в два раза.

Ряд крупных математиков с интересом и успешно работали и работают в области гидрометеорологических исследований. Среди них Л. С. Гандин, Л. Т. Матвеев, Д. Л. Лайхтман, М. И. Юдин, Б. Г. Вагер, В. Н. Морозов и др. Они читали в РГГМУ настолько интересные лекции по математическому моделированию, что ряд их аспирантов, став учёными, тоже уделяли много внимания и времени математическому образованию следующих поколений студентов нашего университета.

Многие из учеников А. Н. Колмогорова создали свои научные школы. А. М. Обухов и А. С. Монин стали знаменитыми учёными в области гидрометеорологии. А. Н. Колмогоров с гордостью говорил, что А. М. Обухов управляет земной атмосферой, а А. С. Монин — океанами [6].

Студентам обязательно следует объяснять, что с развитием математического моделирования роль математики в современном обществе возросла. Этот неоспоримый факт отметил современный российский математик, академик В. И. Арнольд.

Математическое моделирование является важнейшим способом познания окружающего нас мира. В качестве примеров перечислим несколько гидрологических процессов, для которых разработаны и используются математические модели:

- динамика речного стока;
- динамика русловых процессов;
- круговорот различных веществ в водных экосистемах;
- процесс самоочищения и повторного загрязнения водоёмов;

Основой математического моделирования гидродинамических процессов являются одномерные, двумерные и трёхмерные дифференциальные уравнения и системы таких уравнений с различными краевыми и начальными условиями. Например, в простейшем случае модель процесса самоочищения рек — это дифференциальное уравнение первого порядка с заданным начальным условием (задача Коши). В эту модель входят параметры водной среды, а концентрация растворённого кислорода и легко окисляемого биологического вещества представляются как функции, зависящие от времени.

Математической моделью концентрации загрязняющей субстанции, которая переносится потоком воды, является уравнение в частных производных.

В гидрологическом прогнозировании огромную роль играют модели, основанные на математической статистике. Например, систематические наблюдения за изменением уровня реки образуют вариационный ряд, на основе которого даётся краткосрочный или долгосрочный прогноз [8]. Для построения таких прогнозов используются:



- корреляционный анализ;
- регрессионный анализ;
- дискриминантный анализ;
- кластерный анализ;
- факторный анализ и др. [9].

Математическое моделирование различных динамических процессов в атмосфере и океане тоже связано с дифференциальными уравнениями, теорией вероятностей и математической статистикой.

Решение гидрометеорологических и экологических задач с помощью математического моделирования может быть успешным только при условии глубоких знаний математического анализа, высшей алгебры, теории дифференциальных уравнений, теории вероятностей и математической статистики. Для освоения такого большого объёма математики следует начинать и продолжать систематическое обучение студентов с первого по четвертый семестр. Процесс погружения в мир математики может дать положительный результат, если оптимально распределять количество лекций и практических занятий.

### **Применение вычислительной математики в метеорологии**

*В любой науке столько истины,  
сколько в ней математики.*

*Иммануил Кант*

Впервые проблема прогноза погоды как задача математики была рассмотрена в 1904 г. Это была задача решения уравнений в частных производных. Благодаря созданию электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в начале 50-х годов XX века появился первый численный прогноз погоды. В институте перспективных исследований в Принстоне группа учёных создала ряд математических моделей различных атмосферных процессов. В эту группу входил знаменитый Джон фон Нейман. Он считал, что прогноз погоды может быть создан только с помощью компьютеров.

В начале 60-х годов появилась первая девятиуровневая модель, основанная на неупрощённых уравнениях математической физики. Дальнейший прогресс в развитии вычислительной техники привёл к созданию более точных математических моделей и к улучшению качества прогноза погоды. Выяснилось, что основные климатические характеристики, полученные с помощью различных моделей, а затем осреднённые по всему набору моделей, гораздо ближе к реальным характеристикам, чем полученные с помощью отдельных моделей.

В России разработка решения математических моделей изменений климата началась только в 70-х годах XX в. по инициативе президента академии наук СССР, известного математика и специалиста по вычислительной математике Г. И. Марчука. В настоящее время «Вычислительная математика» — хорошо разработанный и теоретически обоснованный раздел современной математики, благодаря которому создано надёжное программное обеспечение для решения множества гидрометеорологических задач.

Существует ряд пакетов стандартных математических программ, например, Mathcad, Matlab и др., в которых реализованы численные методы решения многих математических задач. Для того, чтобы использовать эти популярные во всём мире пакеты, надо знать идею того или иного численного метода, рамки его применения, точность расчёта, требования к исходным данным.

Студенты третьего курса — будущие гидрологи, океанологи и метеорологи — должны уметь решать обычные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных с помощью таких пакетов, поэтому уже на втором курсе студентам читается дисциплина «Вычислительная математика». В нее входят сеточные методы решения дифференциальных уравнений с начальными и граничными (краевыми) условиями. Подробно разбираются явная и неявная схемы решения, устойчивость и условия согласования. Много внимания уделяется сходящимся итерационным процессам. В качестве примера детально разбираются методы Бубнова-Галёркина, Рунге, метод конечных элементов (МКЭ), который во второй половине XX века стал классическим численным методом; его используют в гидрологии и океанологии для решения уравнений мелкой воды с учётом естественной границы (берегов).

Для исследования спектра собственных колебаний в системе океан-атмосфера студентам необходимо знать из высшей алгебры постановку задачи на собственные числа и решение этой задачи в простейших случаях (для матриц второго порядка). Знакомство с этой алгебраической задачей происходит на первом курсе. На втором курсе в цикле лекций «Вычислительная математика» студентов учат решать эту задачу в общем случае итерационными методами. К ним относятся: степенной метод, метод Якоби и метод вращений. Для будущих специалистов очень важным процессом является обработка рядов наблюдений. Этот процесс использует «Теорию аппроксимации», которая читается студентам в курсе лекций «Вычислительная математика».

В обработке рядов наблюдений используют такие важные операции вычислительной математики как интерполяция и экстраполяция. Большую роль играет задача построения непрерывной функции по заданному ряду наблюдений. Для решения этой задачи можно использовать классический метод наименьших квадратов, аппроксимацию многочленами Чебышева, кубические интерполяционные сплайны, гармонический анализ и др.

### Математика и гидромеханика

Преподавателями кафедры наряду с высшей математикой читается необходимый для студентов РГГМУ курс «Основы гидромеханики», в котором уделяется большое внимание связи между математикой и гидромеханикой. Понимание каждой из этих дисциплин становится более глубоким, если использовать следующие простейшие примеры из гидрометеорологии.

1. *Скалярные и векторные поля.* При определении скалярного поля можно сразу отметить, что это скалярная функция, значение которой соответствует некоторой точке пространства. Примеры скалярных полей: температура, давление и плотность воздуха. Они зависят от времени и движения в атмосфере. При

определении векторного поля в качестве примера удобно приводить скорость и направление движения некоторой воздушной массы.

2. *Ротор и дивергенция.* Эти операторы используются и в математике, и в гидромеханике. Они играют важную роль в описании различных гидрометеорологических явлений. С помощью ротора легко определить отсутствие или наличие вихря и его перемещение в воздушной или водной среде. В зависимости от численного значения и знака дивергенции можно обнаружить источники или стоки жидкости в водоёме.

3. *Производная по направлению.* Студенты далеко не сразу понимают смысл использования такой производной. Она весьма полезна, например, при вычислении скорости движения циклона в заданном направлении.

4. *Производные сложных (композиций) функций.* Для описания движения жидкости или газа в гидромеханике используем подход Л. Эйлера. Предположим, что нужно найти скорость изменения температуры движущейся частицы воздуха. Температура изменяется с течением времени. Частица воздуха движется, её координаты тоже зависят от времени, поэтому зависимость температуры от времени — сложная функция, скорость изменения температуры частицы воздуха вычисляется с помощью производной сложной функции. Такая производная показывает влияние скорости ветра на изменение температуры.

5. *Кривые первого и второго порядков.* В гидромеханике траектория движения частиц определяется как геометрическое место точек, занимаемых частицей среды с течением времени. Для представления траекторий движения частиц студенты должны знать из аналитической геометрии канонические уравнения кривых первого и второго порядков.

Кривые первого порядка (прямые) описывают равномерный поток. Кривые второго порядка — различные завихрения (окружности, эллипсы) и обтекание углов (гиперболы). Знание геометрического образа траектории движения способствует быстрому запоминанию структуры соответствующих уравнений.

6. *Вычисление давления.* Давление в атмосфере всегда падает с увеличением высоты, но в разных условиях оно падает по-разному. Если пренебречь изменением плотности воздуха — поведение давления будет одним, если считать, что плотность меняется, а температура постоянна — изменение давления будет другим. Для учёта нескольких параметров влияния на изменение давления следует обращаться к теории дифференциальных уравнений. Весьма полезно решать одно дифференциальное уравнение с одинаковыми начальными условиями, но при различных атмосферных процессах. В таких случаях будут видны отличия значений давления, вычисленных на одинаковой высоте.

### Математика, история, патриотизм

*Гордиться славою своих предков  
не только можно, но и должно.*

*А. С. Пушкин*

Руководство РГТМУ предложило преподавателям уделять больше внимания воспитанию чувства патриотизма у студентов. Вопрос о воспитании патриотизма был и остаётся актуальным. В XIX в. гениальный математик, ректор Казанского

университета Н. И. Лобачевский, обращаясь к студентам, пожелал им составить «честь и славу своему Отечеству». В XX в. великий математик и ректор Петербургского университета А. Д. Александров писал, что студентов следует воспитывать гражданами России — смелыми, умными, инициативными, открытыми для восприятия новых идей.

Патриотизм основан на знании истории своей страны, гордости достижениями и подвигами прошлых поколений и современников. В рамках преподавания воспитание проходит через предмет, поэтому возникла идея об организации систематических выступлений студентов с историческими докладами о зарождении и дальнейшем развитии Российской математической школы.

Пётр I стремился к процветанию России, понимал, что для этого необходимо поставить образование в стране на самый высокий уровень. Ведущую роль он отдавал математике. Прошли столетия, и мечта великого Петра I сбылась. Математическая школа России с середины XX в. стала одной из ведущих математических школ в мире.

История российской математической школы теснейшим образом связана с жизнью и творчеством самих математиков, беззаветно преданных своему делу и России. В библиотеке РГГМУ есть современные учебные пособия, посвящённые этой интересной теме: «Очерки по истории математики» (2013) и «Математики России» (2023).

Отдельные очерки об истории соответствующих разделов высшей математики и её творцах включены в следующие учебные пособия нашего университета: «Высшая алгебра» (2021), «Дифференциальные уравнения» (2020), «Численные методы» (2019), «Основы математического анализа» (2012), «Геометрия» (2010), «Ряды и их приложения» (2023), «Основы математического анализа функций нескольких переменных» (2022), «Основы теории вероятностей и элементы математической статистики» (2018), которые написаны математиками нашей кафедры.

Эксперимент с докладами студентов по истории математики в 2021 г. прошёл удачно. После этого уже третий учебный год студенты первого и второго курсов достойно выступают в своих группах. В марте 2022 г. на секции «Прикладные аспекты высшей математики и теоретической механики в информационных технологиях» в РГГМУ выступила студентка экологического факультета Д. Степанова с докладом «Пётр I и математика». В 2022 г. на международной научно-практической конференции «Информационные системы в Арктике» выступили с докладом «Отто Шмидт – покоритель Севера» студенты второго курса А. Максаров, В. Рубаник и А. Часовников. В апреле 2023 г. на всероссийской научно-практической конференции по гидрометеорологии аудитория с большим вниманием слушала доклад «А. Крылов – великий математик и корабел»; выступали студенты первого курса В. Мишаков, А. Фомина, О. Недбайло. В ноябре 2023 г. на очередной конференции Инфогео студенты второго курса В. Чесноков и М. Гробылев выступили с докладом «П. Чебышев, математика и информатика».

Доклады, связанные с историей появления и развития всемирно известной Российской математической школы и с достижениями великих российских

математиков, положительно влияют на процесс воспитания чувства патриотизма у молодого поколения и повышают у студентов интерес к математике.

### Заключение

Приведём мудрое высказывание известного американского математика Мориса Клайна (1908—1992), посвятившего много научных работ истории математики и вопросам математического образования: «Математика была и остаётся высшим интеллектуальным достижением и наиболее оригинальным творением человеческого духа. Музыка может возвышать или умиротворять душу, философия — удовлетворять потребности разума, инженерное дело — совершенствовать материальную сторону жизни людей. Но математика способна достичь всех этих целей. Если же говорить о возможностях человеческого разума, то математики немало потрудились, чтобы доказать, сколь высокую надёжность результатов способен обеспечить человеческий разум. Математика по-прежнему остаётся эталоном самого надёжного и точного знания, которого мы только в состоянии достичь».

### Список литературы

1. К десятилетию образования Института информационных систем и геотехнологий: история, настоящее, планы на будущее // Гидрометеорология и экология. 2021. №62. С. 165–168.
2. Азизов А. М., Курицын А. Г., Никитенко В. Г. Основы прикладной математики. Теория вероятностей и математическая статистика. СПб: Химия, 1994. 264 с.
3. Беликова Г. И., Радикевич В. В., Толстоброва Н. Б. Численная модель циркуляции Ленгмюра // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. 1998. Вып. 4. СПбГАСУ. С. 41–46.
4. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учётом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. РГМУ. СПб.: 2011, 253 с.
5. Беликова Г. И., Витковская Л. В. Математики России. СПб.: РГМУ. 2023. 104 с.
6. Колмогоров А. Н. Математика в её историческом развитии. М.: Издательство ЛКИ. 2007. 224 с.
7. Сазонова Д. Г. Системный подход к применению математического моделирования в гидрологии // Географический вестник. 2011. №4. С. 39—43.
8. Булатов О. В., Елизарова Т. Г. Регуляризованные уравнения мелкой воды и эффективный метод численного моделирования течений в неглубоких водоёмах // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. Т. 51. №1. С. 170—184.
9. Белолипецкий В. М., Шокин Ю. И. Математические модели в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск: Издательство «ИНФОЛИО-пресс», 1997.

### Информация об авторах

*Галина Иосифовна Беликова*, кафедра высшей математики и физики, Российский государственный гидрометеорологический университет, старший преподаватель, galabel45@gmail.com.

*Екатерина Анатольевна Бровкина*, кафедра высшей математики и физики, Российский государственный гидрометеорологический университет, старший преподаватель, brovkina20146@gmail.com.

*Ирина Владимировна Зайцева*, канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики и физики, Российский государственный гидрометеорологический университет, i.zaitseva@rshu.ru.

*Вера Валерьевна Петрова*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики и физики, Российский государственный гидрометеорологический университет, tutor.tiger@yandex.ru.

*Сергей Николаевич Фадеев*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики и физики, Российский государственный гидрометеорологический университет, fsn3@yandex.ru.

### ***Information about authors***

*Galina Iosifovna Belikova*, senior teacher, department of higher mathematics and physics, Russian State Hydrometeorological University.

*Ekaterina Anatolievna Brovkina*, senior teacher, department of higher mathematics and physics, Russian State Hydrometeorological University.

*Irina Vladimirovna Zaitseva*, PhD (Phys.-Math. Sci.), docent, head of higher mathematics and physics department, mathematician, Russian State Hydrometeorological University.

*Vera Valerievna Petrova*, PhD (Phys.-Math. Sci.), docent, department of higher mathematics and physics, Russian State Hydrometeorological University.

*Sergey Nikolaevich Fadeev*, PhD (Phys.-Math. Sci.), docent, department of higher mathematics and physics, mathematician, mechanic, physicist, Russian State Hydrometeorological University.



УДК 91:061.3

## **Итоги VII международной конференции «Исторический подход в географии и геоэкологии»**

*Людмила Борисовна Вампилова*

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
histgeolbv67@gmail.com

С 21 по 23 сентября 2023 г. в Санкт-Петербурге состоялась VII международная конференция «Исторический подход в географии и геоэкологии». В качестве организаторов конференции выступили Российский государственный гидрометеорологический университет, Русское географическое общество (РГО), Институт Географии РАН, Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена и Псковский государственный университет.

В Оргкомитет конференции вошли специалисты по исторической географии, ведущие отечественные географы и историки, в программный комитет — представители практически всех направлений исторической географии. Участники конференции представляли 20 городов европейской части России и 7 городов азиатской России, четыре зарубежные страны. Представители пяти ведущих академических институтов РАН составили 30 % участников, а 17 учебных заведений России — 70 % участников. Общее число исследователей — 220 человек. По сравнению с числом участников предыдущих конференций было значительно меньше молодежи (30 чел.) и иностранных исследователей (6 чел.).

Конференция стала крупным событием для российских и зарубежных специалистов, работающих в области исторической географии и исторической геоэкологии. Форум продолжил традицию проведения международных конференций по историко-географической тематике на базе учреждений РАН, вузов России и Русского географического общества.

Цель конференции — формирование международной междисциплинарной площадки для обсуждения актуальных теоретических проблем и прикладных исследований, комплексного подхода к изучению влияния природных и антропогенных факторов на ландшафты планеты в историческом прошлом.

Актуальность темы конференции определялась необходимостью изучения процессов освоения и преобразования геосистем, происходивших на протяжении исторического времени. На конференции состоялось обсуждение методологических и методических проблем исторической географии, а также прикладных вопросов, связанных с вкладом исторической географии в информационное обеспечение регионального развития. Содержание докладов отражало общественную значимость историко-географических исследований на фоне процессов, происходящих в современной географической науке.

В ходе конференции были проведены два пленарных заседания, пять секционных, дискуссия по проблеме «Историческая геоэкология: вчера, сегодня,

завтра». На пленарных и секционных заседаниях было заслушано 115 докладов. Обсуждались проблемы, связанные с изучением исторических аспектов взаимодействия социума и природной среды на основе географических, геологических, исторических, археологических, этнографических, топонимических материалов и результатов полевых исследований с использованием ГИС-технологий. Представленные доклады отражали новые подходы к реконструкции палеоэкологических обстановок и традиционных форм природопользования, эволюции сельских и городских поселений, историко-географической периодизации и районированию.

Теоретическим вопросам историко-географической науки был посвящён первый день пленарных заседаний, где были представлены доклады, в содержании которых нашли отражение представления отечественных и зарубежных исследователей о предмете и структуре исторической географии, связь исторической географии с учением о культурном ландшафте и проблемах управления, теоретические основы пространственно-временной парадигмы в географии.

### **Тематика и краткая аннотация секционных заседаний**

Секция I *«Исторические аспекты и ГИС-технологии в гидрометеорологии и океанологии»* (20 докладов). В работы секции представлены результаты исследований, посвященные составлению ретроспективных климатических карт по данным мониторинга XIX века на примере Таврической губернии (А. С. Авилова); глобальному изменению климата (А. Л. Дмитриев), долговременным изменениям климата в пределах Ленинградской области (В. В. Дроздов и др.); реконструкции природных обстановок голоцена, природно-антропогенной эволюции ландшафтов восточных районов России, в частности Приморья (Н.Г. Разжигаева и др., В. Б. Базарова и др.). Доказана актуальность историко-географических исследований для оценки природных рисков и стихийных природных процессов, связанных не только с хозяйственной деятельностью человека, но и с эволюцией природной среды. Создание этой секции было связано со специфической структурой РГГМУ, что привлекло внимание исследователей других регионов России.

Секция II *«Историческая геоэкология и историческое природопользование»* (26 докладов). Из названия секции следует, что тематика докладов была посвящена двум важным аспектам исторической географии. Важной дискуссионной точкой зрения участников конференции было определение места исторической геоэкологии внутри геоэкологической науки, связь с другими экологически направленными дисциплинами и полнота связи с исторической географией. Наибольшее число докладов было посвящено историческому природопользованию: изменению растительности, лесистости, ретроспективы лесопольного земледелия, экологического состояния урбозкосистем и др. В основном эти вопросы рассматривались в пределах европейской части России, а за некоторым исключением по регионам Дальнего Востока, Сибири и Приуралья.

Секция III *«Теория и практика междисциплинарных исследований. Гуманитарные аспекты исторической географии»* (25 докладов). Доклады этой секции

отличались новизной в связи с междисциплинарным подходом к ним: историографические обобщения, гносеологическое моделирование или картографическое источниковедение. Выступления исследователей продемонстрировали обращение географов к новым формам представления результатов изысканий, методике создания электронных историко-географических карт, историко-географических ГИС, возможности использования геоинформатики в образовательных программах. Значительное число докладов было посвящено роли топонимии в историко-географических исследованиях. Географическая привязка работ по топонимии показала, что приоритетными для исследования являются регионы давнего освоения.

Секция IV «*Историческая география: образование, просвещение, воспитание, туризм*» (26 доклад). Перечень докладов, включённых в работу этой секции, показал возможности использования естественнонаучных и гуманитарных методов исследования для изучения процесса хозяйственного освоения регионов, создания историко-географической периодизации и исследования ландшафтной обусловленности природопользования, что вызывает объективную необходимость использования междисциплинарных подходов в системе образования просвещения, воспитания. Особый интерес был вызван к вопросам организации туризма на ООПТ. Был представлен опыт вовлечения школьников в решение конкретных задач с использованием возможностей ГИС на картах Google.

Секция V «*Историко-географические аспекты изучения этноконтактных зон на постсоветском пространстве*» (12 докладов).

Между участниками конференции на секции развернулась дискуссия по поводу определения понятия «этноконтактная зона» (ЭКЗ). В ходе обсуждения было принято определение ЭКЗ, соответствующее геопространственному подходу, разработанному в отечественной культурной географии: ЭКЗ рассматриваются в качестве элемента территориальной структуры этнического слоя геокультурного пространства (этнического пространства), являющегося результатом наложения двух или более этнотерриториальных систем. Основная проблема реализации данной методики связана со сложностью отделения собственно этнических конфликтов от других типов региональных конфликтов (социальных, экономических, политических и др.).

После первого пленарного заседания прошла дискуссия по проблеме «*Историческая геоэкология: вчера, сегодня, завтра*». Модераторами на этой дискуссии выступили сотрудники МГУ — профессор Е. Ю. Колбовский и доцент О. А. Климанова. В процессе дискуссии обосновано направление исторической геоэкологии, определены объект и предмет исследования, аргументированы актуальность постановки проблемы, обозначены цели, задачи и практическая значимость. В настоящее время дискуссионным продолжает оставаться вопрос о степени разработанности этого научного направления. Содержание докладов конференции свидетельствует об использовании объективной и полноценной информационной базы для изучения исторических аспектов геоэкологических ситуаций на различных временных срезах, позволяющих оценить антропогенные изменения ландшафтов и определить время становления антропогенного фактора.

По результатам работы конференции был выпущен сборник материалов «Исторический подход в географии и геоэкологии. Материалы VII Международной научно-образовательной конференции по исторической географии» (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54705110&selid=54705353>).

### ***Сведения об авторе***

*Людмила Борисовна Вампилова*, кандидат географических наук, доцент кафедры водно-технических изысканий Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, Россия, [histgeolbv67@gmail.com](mailto:histgeolbv67@gmail.com)

### ***Information about author***

*Lyudmila Borisovna Vampilova*, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Engineering Studies of the Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.

УДК 33(092)

## К 75-летию со дня рождения Владимира Львовича Квинта



В феврале 2024 г. выдающемуся российскому ученому в области экономики Владимиру Львовичу Квинту исполнилось 75 лет. Владимир Львович в 1972 г. окончил Красноярский институт цветных металлов и получил квалификацию горного инженера-электрика. В 1975 г. он окончил очную аспирантуру и в 26 лет защитил кандидатскую диссертацию по экономике, а уже в 1987 г. — докторскую диссертацию. В 1989 г. ему присвоено ученое звание профессора политической экономики.

В 1989—1990 гг. Владимир Львович Квинт совмещал работу в Институте экономики АН СССР с проведением исследований новых рынков в Австрии, а затем — в США, где, в основном, и закончил разработку основ теории Глобального формирующегося рынка. За эти исследования позже он и получил международное признание. Ведущими научными издательствами США и Великобритании были опубликованы его книги и монографии «The Global Emerging Market in Transition» (Глобальный формирующийся рынок в переходный период — 1999 г.; дополненное издание — 2004 г.), «The Global Emerging Market: Strategic Management and Economics», Routledge, 2009 (Глобальный формирующийся рынок: стратегическое управление и экономика — 2009 г.; на русском языке опубликована издательством «Бюджет» в 2012 г.), «Strategy for the Global Market. Theory and Practical Applications», Routledge, 2015 (Стратегия на глобальном рынке. Теория и практические приложения).

В течение 1990 г. — 2006 г. В.Л. Квинт плодотворно преподавал в ведущих иностранных университетах. С 1990 г. и до осени 2004 г. он являлся профессором систем управления и стратегии международного бизнеса (с концентрацией на стратегии бизнеса) Высшей школы бизнеса Фордемского университета в Нью-Йорке, а параллельно — с 1995 г. до 2000 г. — был адъюнкт-профессором международной

бизнес-стратегии Высшей школы бизнеса им. Стерна Нью-Йоркского университета. Он развил основные элементы теории Глобального формирующегося рынка и Общей теории стратегии и представлял их на многих конференциях; опубликовал 11 книг и несколько статей в ведущих деловых и академических журналах и газетах США. За эти исследования в 1997 г. В.Л. Квинт был удостоен звания «Почетный доктор университета Бриджпорт» и премии им. Дж. Фулбрайта по экономике (2001 г.), США. В 2004 г.—2007 г. он являлся профессором международного бизнеса в Бизнес Школе им. Когода Американского университета в г. Вашингтоне. В течение этого периода он преподавал следующие курсы: «Основы стратегии международного бизнеса», «Глобальный рынок», «Стратегическое управление экспортно-импортными операциями», «Сравнительные системы стратегического управления», а также разработал и вёл курс «Глобальный возникающий рынок».

В 2006 г. Владимир Львович избран в Российскую академию наук иностранным членом. С июня 2007 г. он работал заведующим кафедрой экономической и финансовой стратегии Московской школы экономики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, а с февраля 2010 г. — директором Центра стратегических исследований Института математических исследований сложных систем МГУ им. М. В. Ломоносова. Решением Учёного Совета Московского государственного университета В. Л. Квинту присуждена высшая награда Московского университета — Премия имени М. В. Ломоносова за научные работы I степени: за цикл работ «Теория стратегии и методология стратегирования».

В 2009 г. Лондонская школа экономики и политических наук пригласила Владимира Квинта для публичного представления результатов его исследований глобального формирующегося рынка. В 2010 г. он выступал в Парламенте Шотландии, а в 2009 г.—2013 г. его приглашали выступать с актовыми лекциями в Эдинбургский университет и в Имперский колледж Лондона. С 2019 г. В. Л. Квинт является Почетным приглашённым профессором стратегии Школы экономики Шанхайского университета.

В 2013 г.—2014 г. он член Коллегии Министерства регионального развития Российской Федерации; членом советов директоров нескольких компаний и банков.

В 2011 г.—2019 г. член президиума Экономического совета при Губернаторе Санкт-Петербурга. Также в 2012 г.—2018 г. он принимал активное участие в разработке и принятии Стратегии экономического и социального развития Санкт-Петербурга до 2030 года, которая была оценена Минрегионразвития РФ, как «эталонная», а сам В. Л. Квинт назвал документ «пионерным для страны». Затем эта стратегия была переработана в Стратегию социально-экономического развития Санкт-Петербурга до 2035 г. С 2020 г. является членом президиума Экономического совета при губернаторе Кемеровской области — Кузбасса.

В 2018 г. творческий коллектив учёных Центра стратегических исследований Института математических исследований сложных систем (ИМИСС) МГУ имени М. В. Ломоносова, МШЭ МГУ, Центрального экономико-математического института РАН и Северо-Западного института управления РАНХИГС под научным руководством В. Л. Квинта разработал Стратегию развития водоснабжения и



водоотведения Санкт-Петербурга до 2035 г. и на более длительную перспективу. В 2019 г.—2020 г. коллектив ЦСИ МГУ совместно с учеными и специалистами других организаций, разработал Стратегию социально-экономического развития Кузбасса до 2035 г. и на более длительную перспективу и Стратегию водоснабжения, водоотведения и водного баланса Республики Узбекистан на период до 2035 г., а также методологию стратегирования ГУП «Петербургский метрополитен».

В 2017 г.—2021 г. В. Л. Квинт — член Общественной палаты Московской области с 2022 г. — член Президиума Международного Союза экономистов, член Правления Вольного Экономического Общества России. 50 лет научной деятельности В. Л. Квинта были посвящены созданию теории нового регионального экономического развития, теории формирующихся (возникающих) рынков, общей теории стратегии и методологии стратегирования. Среди его достижений можно выделить следующие:

- теория регионализации научно-технического прогресса;
- оценка роли научно-технической стратегии в региональной экономике;
- развитие методологии региональных стратегических программ;
- теория глобального формирующегося (возникающего) рынка;
- системное стратегирование на формирующихся (возникающих) рынках;
- разработка экономических перспектив и стратегии производства и распределения этанола и других видов биотоплива;
- разработка общей теории стратегии;
- разработка методологии стратегирования.

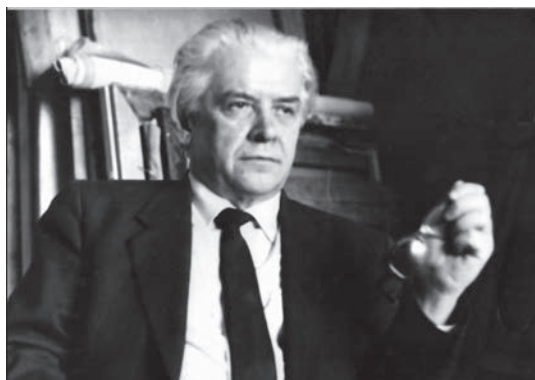
В. Л. Квинт — главный редактор журналов «Экономика промышленности» (Russian Journal of Industrial Economics), «Стратегирование: теория и практика» (Strategizing: Theory and Practice), член редколлегии журналов «Экономика и математические методы» (Economics and mathematical methods), «Экономический анализ: теория и практика», «Экономическое возрождение России», «Review of Business and Economics Studies (ROBES)», «International Journal of Emerging Markets» и ряда других.

25 августа 2023 г. за выдающиеся заслуги в развитии российской науки Президент Российской Федерации В.В. Путин своим Указом № 643 наградил Владимира Львовича Квинта Орденом Александра Невского.

Редколлегия журнала «Гидрометеорология и экология» очень приятно, что В. Л. Квинт является членом Редсовета нашего журнала. Сердечно поздравляем Владимира Львовича Квинта с юбилеем! Желаем долгих лет жизни и новых больших достижений в развитии отечественной науки!

УДК 551.5(092)

## Памяти Евгения Пантелеймоновича Борисенкова (1924 г. — 2005 г.)



29 января 2024 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося советского и российского ученого в области климатологии, физики атмосферы и океана, заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, заслуженного метеоролога Российской Федерации, доктора физико-математических наук, профессора Евгения Пантелеймоновича Борисенкова.

Он родился в г. Вязьма Смоленской области. В 1941 г. добровольцем ушел на фронт (призван в ряды Красной Армии Сталинским РВК г. Свердловска 5 ноября 1941 г.). Участвовал в боях на Волховском фронте в составе 28-го гвардейского минометного полка, а также на Северо-Западном и 2-м Прибалтийском фронтах в составе 140-го армейского запасного стрелкового полка 22-й армии.

После окончания войны в 1952 г. он окончил Высший военный гидрометеорологический факультет Советской Армии, который позже в качестве метеорологического факультета вошел в состав Ленинградской Краснознаменной Военно-воздушной инженерной академии (ЛКВВИА) имени А. Ф. Можайского (ныне Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского). В 1957 г. окончил адъюнктуру ЛКВВИА имени А. Ф. Можайского и защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему «Преобразование полей давления и ветра в верхней тропосфере и нижней стратосфере».

С 1957 г. последовательно занимал должности преподавателя и доцента кафедры синоптической и динамической метеорологии Ленинградской Краснознаменной Военно-воздушной инженерной академии имени А. Ф. Можайского до завершения военной службы 1 июня 1963 г. в воинском звании инженера-подполковника. В 1963 г. защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук на тему «Предвычисление и численный анализ метеорологических полей в высоких широтах Северного полушария».

С 1963 г. по 1972 г. Е. П. Борисенков работал в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) в должности заместителя директора и начальника отдела теории взаимодействия атмосферных и океанических процессов. В 1972 г. был назначен директором Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, которой руководил до 1994 г., затем продолжил трудиться в Обсерватории на должности главного научного сотрудника (вплоть до своей смерти 15 сентября 2005 г.).

Круг научных интересов Е. П. Борисенкова был весьма широк. В разные годы его исследования проходили в области физики атмосферы и океана, спутниковой метеорологии, теоретической и прикладной климатологии, истории климата. Его работы внесли весомый вклад в каждую из этих областей и получили высокую оценку научной общественности. Он был инициатором разработки и реализации национальной, а затем международной программы полярного эксперимента. Признанием заслуг Евгения Пантелеймоновича в этой области стало избрание его сначала председателем Полярной комиссии Межведомственного геофизического комитета при Президиуме Академии наук СССР, а затем — президентом Международной комиссии по полярной метеорологии Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы (МАМФА).

Е. П. Борисенковым выполнена серия теоретических и экспериментальных работ по изучению физических процессов обледенения морских судов в различных гидрометеорологических условиях. Разработанные по результатам этих исследований практические рекомендации были успешно внедрены в практику гидрометеорологического обеспечения промыслового флота. Эти работы были удостоены премии имени Ю. М. Шокальского. Во второй раз премия имени Ю. М. Шокальского была ему присуждена за цикл работ по изучению тепло- и влагообмена между атмосферой и океаном при наличии полярных льдов.

Е. П. Борисенков в течение нескольких десятилетий активно участвовал в разработке численных физико-статистических схем долгосрочных метеорологических прогнозов, которые продолжают использовать в оперативной практике. Он также много занимался изучением влияния солнечной активности на погоду и климат. Под его руководством и при непосредственном участии были выполнены фундаментальные исследования в области общей и прикладной климатологии, по результатам которых вышла в свет серия климатических справочников и монографий, в том числе «Атлас гидрометеорологических данных Европы». Цикл этих работ был отмечен присуждением премии имени А. И. Воейкова. Результатом исследований по истории климата стала публикация трех монографий (в соавторстве с В. М. Пасецким) — летописей необычайных явлений природы за последнюю тысячу и две с половиной тысячи лет.

Новые и важные результаты были получены Е. П. Борисенковым по моделированию углеродного цикла в системе «атмосфера—океан—биосфера». Под его руководством в 1983 г. в ГГО им. А. И. Воейкова был сделан прогноз содержания углекислого газа в атмосфере на 50 лет вперед, который до настоящего времени имеет практически 100-процентную оправдываемость, что является единственным результатом в мире.

Ряд его публикаций последних лет жизни посвящен новому направлению исследований в области геофизической гидродинамики. Это направление учитывает влияние аномалий стационарного и нестационарного гравитационных полей на процессы, протекающие в атмосфере и океане.

Почти 40 лет Е. П. Борисенков вел активную педагогическую работу в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербургском государственном университете и Российском государственном гидрометеорологическом университете. Им подготовлено пять докторов наук и более 20 кандидатов наук. В списке его публикаций более 500 работ, в числе которых 25 монографий, учебники и учебные пособия и др. Ряд его работ был издан за рубежом. За боевые и трудовые заслуги Е. П. Борисенков награжден орденом Красной Звезды (1956 г.), орденом Трудового Красного Знамени, орденом Отечественной войны II степени (1985 г.), орденом Почета (1999 г.), более 20 медалями.

Сослуживцы, коллеги и ученики уважали и любили его. Хорошая и светлая память о Евгении Пантелеймоновиче Борисенкове навсегда сохранится в наших сердцах.



НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 74

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Литературный редактор* Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент  
*Технический редактор* М. В. Иванова

---

Подписано в печать 01.04.2024. Выход в свет 10.04.2024. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,325. Тираж 50 экз. Заказ № 1467. Цена свободная.  
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет

---