

ISSN 2411-7374 (print)  
ISSN 2782-6643 (online)



# РОССИЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ

2/2025





## Учредитель

Государственное научное бюджетное учреждение  
«Академия наук Республики Татарстан»

## Издатель

Институт проблем экологии и недропользования  
АН РТ

## Главный редактор

**Р.Р. Шагидуллин**

д.х.н., член-корреспондент АН РТ, директор Института  
проблем экологии и недропользования АН РТ

## Заместители главного редактора

**В.З. Латыпова**

д.х.н., профессор, член-корреспондент АН РТ,  
профессор кафедры прикладной экологии Казанского  
(Приволжского) федерального университета

**Д.В. Иванов**

д.г.н., заместитель директора по научной работе  
Института проблем экологии и недропользования  
АН РТ

## Редакция

Ответственный секретарь: к.с.-х.н. Э.Х. Рупова,  
старший научный сотрудник, Институт проблем  
экологии и недропользования АН РТ  
Компьютерная верстка: А.Ю. Бородовская  
Фото на обложке: А.Ю. Бородовская, Э.Х. Рупова

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по  
надзору в сфере связи, информационных технологий и  
массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации  
в СМИ ПИ № ФС77-67305 от 30.09.2016

Журнал входит в перечень рецензируемых научных  
изданий, рекомендованных ВАК РФ, в которых долж-  
ны быть опубликованы основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученой степени кандидата  
наук, ученой степени доктора наук.

Журнал включен в систему Российского индекса  
научного цитирования (РИНЦ)

Периодичность выпуска: 4 раза в год  
Электронная версия журнала содержится на сайте  
eLIBRARY.ru

Подписной индекс ПМ018 в каталоге «Почта России».  
Цена свободная

### Адрес издателя:

420111, Республика Татарстан,  
г. Казань, ул. Баумана, 20

### Адрес редакции:

420087, Республика Татарстан, г. Казань,  
ул. Даурская, 28  
тел./факс: +7 (843) 275-96-95  
e-mail: rjaeco@mail.ru  
www.rjae.ru

## Редакционная коллегия

**В.И. Бармин** – д.г.н., профессор, профессор кафедры  
экологии, природопользования, землеустройства и БЖД  
Астраханского государственного университета

**В.Д. Богданов** – д.б.н., член-корреспондент РАН, зав.  
лабораторией экологии рыб и биоразнообразия водных  
экосистем Института экологии растений и животных  
УРО РАН

**Ю.А. Горшков** – д.б.н., ведущий научный сотрудник  
Волжско-Камского государственного природного биос-  
ферного заповедника

**В.А. Даувальтер** – д.г.н., профессор, главный научный  
сотрудник лаборатории водных экосистем Института  
проблем промышленной экологии Севера РАН

**В.В. Законнов** – д.г.н., главный научный сотрудник ла-  
боратории гидрологии и гидрохимии Института биоло-  
гии внутренних вод им. А.Д. Папанина РАН

**Е.Ю. Колбовский** – д.г.н., профессор, ведущий науч-  
ный сотрудник кафедры физической географии матери-  
ков и геоэкологии Московского государственного уни-  
верситета им. М.В. Ломоносова

**Ю.П. Переведенцев** – д.г.н., профессор кафедры мете-  
орологии, климатологии и экологии атмосферы Казан-  
ского (Приволжского) федерального университета

**С.А. Поддубный** – д.г.н., зав. лабораторией гидрологии  
и гидрохимии Института биологии внутренних вод им.  
А.Д. Папанина РАН

**Ш.Р. Поздняков** – д.г.н., директор Института исследо-  
ваний континентальных водных объектов Российского  
государственного гидрометеорологического универси-  
тета

**В.А. Румянцев** – д.г.н., профессор, академик РАН,  
советник по науке Санкт-Петербургского научного  
Центра РАН

**Р.Н. Салиева** – д.ю.н., профессор, зав. лабораторией  
правовых проблем недропользования, экологии и то-  
пливно-энергетического комплекса Института проблем  
экологии и недропользования АН РТ

**В.И. Сафарова** – д.х.н., профессор, начальник управ-  
ления государственного аналитического контроля Управ-  
ления природопользования и экологии Республики  
Башкортостан, зав. кафедрой «Экоинжиниринг, приро-  
дообустройство и экологические технологии» Уфим-  
ского государственного нефтяного технического уни-  
верситета

**В.В. Снакин** – д.б.н., профессор, зав. сектором музея  
землеведения Московского государственного универси-  
тета им. М.В. Ломоносова, г. Москва; зав. лабораторией  
ландшафтной экологии Института фундаментальных  
проблем биологии РАН

**А.М. Смирнов** – д.б.н., академик РАН, научный руко-  
водитель Всероссийского научно-исследовательского ин-  
ститута ветеринарной санитарии, гигиены и экологии;

**Т.Х. Спаркс** – PhD, профессор, Институт зоологии По-  
знаньского университета естественных наук (Польша);  
Музей зоологии Кембриджского университета (Велико-  
британия)

**Ю.А. Тунакова** – д.х.н., профессор, зав. кафедрой  
общей химии и экологии Казанского национального  
исследовательского технического университета им.  
А.Н. Туполева – КАИ.

Ответственность за содержание статей несут авторы.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой  
на «Российский журнал прикладной экологии»

## Founder

State Institution «Tatarstan Academy of Sciences»

## Publisher

Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences

## Chief Editor

### R.R. Shagidullin

Doctor in Chemistry, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Director, Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences

## Deputy Chief Editors

### V. Z. Latypova

Doctor in Chemistry, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Professor of the Department of Applied Ecology of Kazan (Volga) Federal University

### D.V. Ivanov

Doctor in Geography, Deputy Director, Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences

## Executive secretary

E.H. Rupova – PhD in Agriculture, Senior Researcher, Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences

Designer: A.Yu. Borodovskaya

Cover photo: A.Yu. Borodovskaya, E.H. Rupova

The journal is registered by Federal service for supervision in the sphere of telecom, information technologies and mass communications. Registration number: series PI №FS77-67305 on September 30, 2016.

The journal is indexed in Russian Science Citation Index (RSCI)

Frequency: 4 issues per year

The electronic version of the journal is available on the website eLIBRARY.ru.

Subscription index PM018 in catalogue of «Pochta Possii». Free price.

## Publisher's address:

20, Bauman st., Kazan, Republic of Tatarstan,  
420111, Russia

## Editorial address

28, Dauraskaya st., Kazan, Republic of Tatarstan,  
420087, Russia  
Phone: +7 (843) 275-96-95

E-mail: rjaeco@mail.ru  
www.rjae.ru

## Editorial board

**A.N. Barmin** – Doctor in Geography, Professor, Professor of the Department of Ecology, Nature Management, Land Management and Life Safety, Astrakhan State University

**V.D. Bogdanov** – Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Head Laboratory of Fish Ecology and Biodiversity of Aquatic Ecosystems, Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of RAS

**Y.A. Gorshkov** – Doctor in Biology, Leading Researcher, Volga-Kama State Natural Biosphere Reserve

**V.A. Dauvalter** – Doctor in Geography, Professor, Chief Researcher, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS

**V.V. Zakonnov** – Doctor in Geography, Leading Researcher, I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS

**E.Yu. Kolbovsky** – Doctor in Geography, Professor, Leading Researcher of the Department of Physical Geography of Continents and Geoecology, Lomonosov Moscow State University

**Yu.P. Perevedentsev** – Doctor in Geography, Professor, Head of the Department of Meteorology, Climatology and Ecology of the Atmosphere, Kazan (Volga) Federal University

**S.A. Poddubny** – Doctor in Geography, Head of the laboratory of hydrology and hydrochemistry, I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS

**Sh.R. Pozdnyakov** – Doctor in Geography, Director, Institute of Inland Waters Research, Russian State Hydrometeorological University

**V.A. Rumyantsev** – Doctor in Geography, Professor, Academician of RAS, Scientific Advisor, St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

**R.N. Salieva** – Doctor in Law, Professor, Head of the Laboratory of Legal Problems of Mineral Wealth Use, Ecology and Fuel and Energy Complex, Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences

**V.I. Safarova** – Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Department of State Analytical Control, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Bashkortostan; Head of the Department of Eco-engineering, nature management and environmental technologies of the Ufa State Petroleum Technological University

**V.V. Snakin** – Doctor in Biology, Professor, Head of the Sector of the Museum of Geography, Lomonosov Moscow State University; Head of the Laboratory of Landscape Ecology, Institute of Fundamental Problems of Biology of RAS

**A.M. Smirnov** – Doctor in Biology, Academician of RAS, Scientific Director, All-Russian Research Institute of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology

**T.H. Sparks** – PhD, Professor, Institute of Zoology, Poznań University of Life Sciences (Poland); Museum of Zoology, University of Cambridge (UK)

**Yu.A. Tunakova** – Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Department of General Chemistry and Ecology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

The authors are responsible for the content of the articles.

Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing.

## СОДЕРЖАНИЕ

## Экология природных систем

*С.М. Гусев, Н.А. Чижикова*  
Влияние климата на радиальный рост сосны обыкновенной на территории Байкальского заповедника ..... 4

*Р.П. Горбунов, В.В. Алексанов, Т.М. Теофилова, В. Ланграф, И.А. Солодовников, Р.А. Суходольская*  
Изменчивость размеров тела жукелиц вдоль географических градиентов (на примере *Carabus granulatus L.*) ..... 12

## Экология урбанизированных территорий

*Б.Т. Ваганов, К.К. Ибрагимова, Н.С. Архипова, А.В. Аринина, И.И. Рахимов*  
Анализ распределения пыльцы в городской среде на разной высоте ..... 22

## Гидроэкология

*О.В. Морозова, С.В. Бердник, Д.С. Любарский*  
Оценка экологического состояния озер Большое Голубое и Малое Голубое по микробиологическим показателям в сезонной динамике ..... 30

*Р.П. Токинова, К.И. Абрамова, Л.К. Галияхметова, С.В. Бердник, Р.Р. Шагидуллин*  
Биоиндикация состояния экосистемы озера Архьерейское по структуре планктонных сообществ ..... 39

## Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

*С.Е. Беднарук, В.В. Чуканов, А.В. Мاستрюкова, Н.Н. Чернобровкин*  
Разработка математической модели Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги как инструмента совершенствования режимов работы Нижневолжских водохранилищ ..... 51

*В.С. Валиев, Д.В. Иванов, Р.Р. Хасанов*  
Оценка взаимосвязи качества воды малых рек и значений суммарного годового слоя осадков ..... 59

*И.И. Зиганшин, Д.В. Иванов, И.М. Сафин*  
Анализ пространственного распределения и гидрографическая характеристика отчлененных заливов Тетюшского плеса Куйбышевского водохранилища ..... 66

*Правила для авторов* ..... 71

## CONTENTS

## Ecology of natural systems

*Gusev S.M., Chizhikova N.A.*  
Influence of climate on the radial growth in Scots pine at the territory of the Baikal reserve. .... 4

*Gorbunov R.P., Alexanov V.V., Teofilova T.M., Langraf V., Solodovnikov I.A., Sukhodolskaya R.A.*  
Variation in body size along geographical gradients in ground beetles (the case study in *Carabus granulatus L.*) ..... 12

## Ecology of urbanized territories

*Vaganov B.T., Ibragimova K.K., Arinina A.V., Arhipova N.S., Rakhimov I.I.*  
Analysis of pollen distribution in the urban environment at different heights ..... 22

## Hydroecology

*Morozova O.V., Berdnik S.V., Lyubarsky D.S.*  
Assessment of Bolshoe Goluboe and Maloe Goluboe lakes ecological status by means of microbiological indicators in seasonal dynamics ..... 30

*Tokinova R.P., Abramova K.I., Galiahetova L.K., Berdnik S.V., Shagidullin R.R.*  
Bioindication of Arkhiereiskoe Lake ecosystem condition based on the structure of planktonic communities ..... 39

## Land hydrology, water resources, hydrochemistry

*Bednaruk S.E., Chukanov V.V., Mastryukova A.V., Chernobrovkin N.N.*  
Development of the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga river delta mathematical model as a tool for improving of the Lower Volga reservoirs management ..... 51

*Valiev V.S., Ivanov D.V., Khasanov R.R.*  
Assessment of the relationship between the rivers water quality and the total annual precipitation ..... 59

*Ziganshin I. I., Ivanov D.V., Safin I.M.*  
Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir ..... 66

*Rules for authors* ..... 71

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА РАДИАЛЬНЫЙ РОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ТЕРРИТОРИИ БАЙКАЛЬСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Понимание взаимосвязей между температурой, осадками и радиальным приростом деревьев позволяет более точно прогнозировать последствия климатических изменений для лесных экосистем. Выявлены закономерности годового радиального роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Байкальского государственного природного биосферного заповедника (Республика Бурятия). Построены индивидуальные и обобщенные хронологии ширины годичных колец, что позволило получить более полное представление о динамике роста этого вида. Большинство хронологий покрывают период с 1940 по 2019 годы. Результаты показывают, что радиальный прирост сосны обыкновенной имеет устойчивую обратную зависимость от температуры предыдущего лета: более высокие температуры прошлого лета приводят к пониженному радиальному росту в текущем году. Это может быть связано с ухудшением условий, вызванным засушливыми периодами или лесными пожарами, которые оказывают негативное влияние на здоровье деревьев. Кроме того, климатические данные подтверждают, что в регионе наблюдается рост средней температуры летних месяцев на 2°C и снижение июльских осадков в среднем на 60 мм. Эти изменения могут негативно сказываться на сезонном росте сосны обыкновенной, поскольку для ее нормального развития необходима достаточная почвенная влага в середине и конце лета.

*Ключевые слова:* дендрохронология; хвойные виды; *Pinus sylvestris* L.; годичные кольца; dplR.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.04.11>

### Введение

Рост древесных колец определяется как биотическими, так и абиотическими факторами окружающей среды. Хронология древесных колец представляет собой важный источник информации для дендрохронологических исследований. Последние помогают понять степень влияния климатических воздействий на рост деревьев, реконструировать прошлые климатические условия, датировать стихийные бедствия и катастрофы (Isebrands et al., 2000).

Как правило, связь между ростом деревьев и климатом является достаточно сложной: влияние температуры и влаги на ежегодный рост имеет нелинейный характер, варьируется в зависимости от сезона и взаимосвязано между собой (Isebrands et al., 2000; Lloyd et al., 2013; Lee et al., 2013, 2016). Установлено влияние температуры и количества осадков предшествующего года на радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (Данчева и др., 2020; Хорошев и др., 2021). Климат играет важную роль в динамике популяций лесных патогенов и вредителей, которые, в свою очередь, влияют на рост деревьев (Alfaro et al., 2014; Alfaro et al., 1982; Black et al., 2010; Lee et

al., 2013) и еще больше усложняют формирование выводов о взаимосвязи роста и климата.

При изучении радиального роста деревьев, произрастающих на охраняемых природных территориях, фокус внимания может быть сведен на влияние климата, поскольку антропогенная составляющая этих местообитаний минимальна.

Цель работы заключается в анализе и выявлении закономерностей годового радиального роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории Байкальского государственного природного биосферного заповедника.

### Материалы и методы исследования

ФГБУ «Байкальский государственный природный биосферный заповедник» расположен в Кабанском районе Республики Бурятия, у подножья северного склона хребта Хамар-Дабан, на южном берегу озера Байкал и занимает небольшую часть прибайкальской террасы. Хребет Хамар-Дабан, протянувшийся более чем на 200 км, достигает высоты 1800–2000 м, с максимальной точкой на горе Сохор (2304 м). Климатические условия региона определяются озером Байкал, что приводит к значительным осадкам, особенно на северо-за-

падных склонах, где их количество может достигать 1800 мм в год. В зимний период высота снегового покрова достигает 2 м, почвы промерзают незначительно. Средняя температура воздуха варьируется от  $-18^{\circ}\text{C}$  в январе до  $+14^{\circ}\text{C}$  в июле (Климат ..., 2024).

На северо-западных склонах хорошо прослеживаются три основных растительных пояса: лесной (темнохвойный), субальпийский (кустарниково-разнотравный), альпийский (высокогорная тундра). На юго-восточных склонах, где присутствует вечная мерзлота и осадки выпадают в меньшем количестве, растительность отличается (Галазий, 1988). Нижняя часть лесного пояса покрыта светлохвойными лиственнично-сосновыми

лесами. В верхней части преобладают кедровые леса, с редкими лиственничными участками. Субальпийский пояс состоит из редколесий подгольцового типа и травяных альп, сменяющихся высокогорными тундрами.

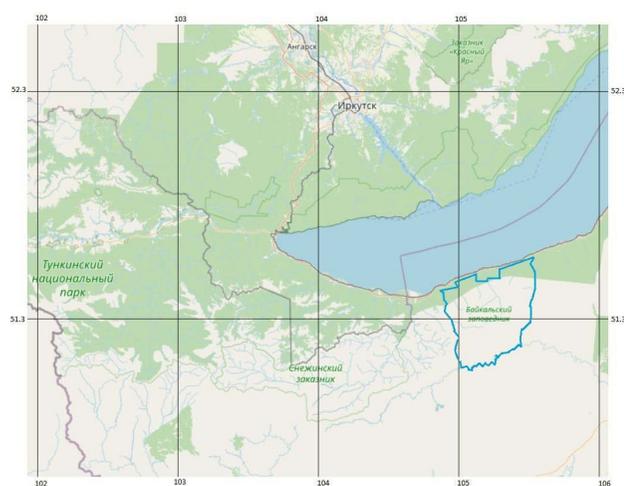
Керны сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) были отобраны с 8 пробных площадок (рис. 1) в июле 2019 г. с помощью возрастного бура Haglof. Размер каждой пробной площади  $20 \times 20$  м. Образцы древесины отбирались перпендикулярно продольной оси ствола дерева на высоте 1.0–1.3 м от поверхности земли в соответствии с методикой (Шиятов и др., 2000). Для каждой площадки определены координаты и высота рельефа над уровнем моря (табл. 1).

Всего отобрано 65 кернов с 48 деревьев: 12 кернов с северного макросклона, 53 керна с южного макросклона. Ширина годичных колец измерялась на приборе Lintab-6 (Rinntech).

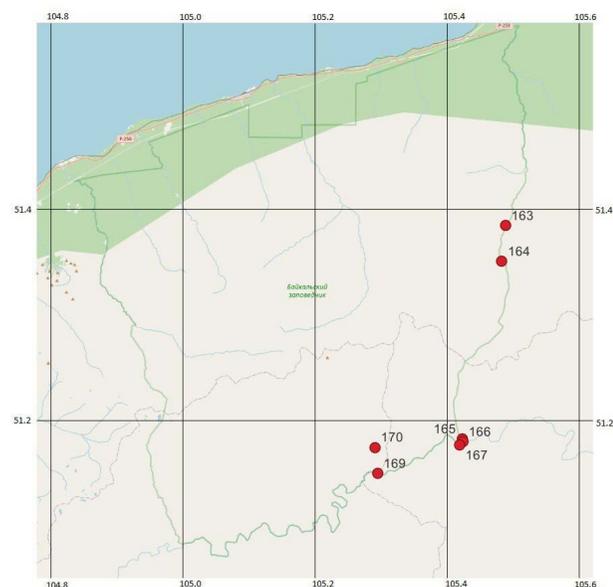
Перед началом вычисления индивидуальных хронологий радиального прироста замеры кернов, относящихся к одному дереву, были усреднены. Конечный массив данных состоит из индивидуальных хронологий, представляющих измерения единичных кернов или результат усреднения нескольких кернов, исключая измерения слабо коррелирующих друг с другом кернов. Причиной слабой корреляции является присутствие ложных колец и сложность их датировки. На основе индивидуальных хронологий радиального прироста были вычислены индексы радиального прироста путём удаления возрастного тренда роста. Так как закономерность изменения ширины радиальных колец имела сложную форму, для оценки возрастного тренда радиального роста был использован метод подгонки сплайн функции, потому что этот метод гибко подстраивается под любые формы зависимостей.

Также были вычислены обобщенные хронологии роста сосны. Связь радиального прироста с погодными условиями характеризовалась с помощью корреляционного анализа.

Координаты метеостанций и погодные данные (среднемесячные температуры, месячные суммы осадков) получены со справочно-информационного портала «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru/>). Северный и южный склон хребта Хамар-Дабан сильно отличаются по климатическим характеристикам, поэтому для выполнения анализа связи радиального прироста с погодными условиями площадок 163 и 164 северного макросклона хребта Хамар-Дабан (табл. 1) использованы данные с метеостанции Танхой, которая находится от них на расстоянии 32.9 км. Для площадок 165–170 южного макроскло-



а



b

Рис. 1. Карта исследуемой территории:  
а – Байкальский заповедник,  
б – пробные площадки  
Fig. 1. Location of study:  
а – Baikal Nature Reserve, б – study sites

Таблица 1. Описание пробных площадок  
Table 1. Description of study sites

Идентификатор ID	Координаты Coordinates	Высота над у.м., м Altitude above sea level, m	Название сообщества Community name	Экспозиция склона Slope exposure
163	N 51.43232 E 105.51664	825	Смешанный хвойно-березовый с подростом темнохвойных черничный зеленомошный лес	Северный
164	N 51.39854 E 105.51142	956	Кедровый с примесью сосны бруснично-багульниковый зеленомошный лес	Северный
165	N 51.23 E 105.45123	849	Лиственнично-сосновый с березой шиповниковый разнотравно-брусничный лес	Южный
166	N 51.2273 E 105.45252	863	Березовый с сосной с подлеском из рододендрона даурского разнотравно-брусничный лес	Южный
167	N 51.22465 E 105.44767	845	Сосняк, пройденный беглым низовым пожаром, с разреженным травяным ярусом	Южный
169	N 51.19748 E 105.32373	895	Лиственнично-сосновый с примесью березы, ели и тополя лес с подростом березы и сосны, кустарниками хвощово-грушанково-разнотравный лес	Южный
170	N 51.22211 E 105.31918	996	Сосняк с березой и лиственницей, негустым подлеском из рододендрона даурского брусничный зеленомошный лес	Южный

на хребта Хамар-Дабан использованы данные с метеостанций, расположенных в пос. Петропавловка и в пос. Новоселенгинск (расстояние от указанных метеостанций 110 км и 160 км, соответственно). Метеостанция Танхой расположена рядом с берегом озера Байкал, где образуется уникальный климат с избытком осадков. Высота хребта не дает возможности осадкам пройти ее, с чем связано их малое количество на южном макросклоне, где находятся метеостанции Новоселенгинск и Петропавловка. Южная часть хребта Хамар-Дабан характеризуется резко континентальным климатом.

В работе использовался пакет dplR (Bunn, Korpela, 2018) системы анализа и среды статистических вычислений R (R core team, 2024).

### Результаты и их обсуждение

При анализе годового распределения осадков установлено (рис. 2), что основное их количество приходится на вегетационный период (май–сентябрь), для Танхой значение медианы суммарных месячных осадков в июле достигает 159 мм, Новоселенгинска – 62 мм, Петропавловки – 58 мм. Наблюдается уменьшение количества суммарных месячных осадков в июне (в среднем на 60 мм) и в июле (в среднем на 15 мм) с 1970 по 2020 гг. для метеостанций пос. Танхой и пос. Новоселенгинск, соответственно. Однако только в Новоселенгинске изменения в июле являются статистически значимыми, с уровнем значимости менее 0.05.

Анализ годового распределения температур (рис. 3) показал, что средняя температура июля,

зафиксированная метеостанцией Танхой, не превышает 15 °С, тогда как для Новоселенгинска и Петропавловки этот показатель находится выше 20 и 18 °С, соответственно.

Для всех метеостанций выявлены тренды средней температуры теплого периода. Рост средней температуры за весь период наблюдений составил в среднем 2 градуса при уровне значимости < 0.05.

Были получены индивидуальные хронологии радиального прироста для 48 деревьев. Большинство хронологий покрывают период 1940–2019 гг.

На основе индексов прироста вида в местообитании построены обобщенные хронологии видов для каждой площадки (как среднее индексов) и для всех площадок (рис. 4).

Хронологии из близкорасположенных местообитаний обладают отчетливой синхронностью (табл. 2). В нескольких случаях зафиксировано сходство радиального роста у деревьев из удаленных друг от друга местообитаний. В целом хронологии деревьев из северного макросклона (163, 164) имеют низкую корреляцию с хронологиями деревьев южного макросклона (местообитания 165-170).

Следующим этапом являлось нахождение связи радиального прироста с климатическими характеристиками. Использовались значения месяцев прошлого года (с мая по декабрь / PMAY – PDEC) и текущего года (с января по октябрь / JAN – OCT), суммарные годовые осадки текущего и прошлого года (СТОТ, РТОТ) и средние годовые температуры текущего и прошлого года (СТОТ, РТОТ) (рис. 5).

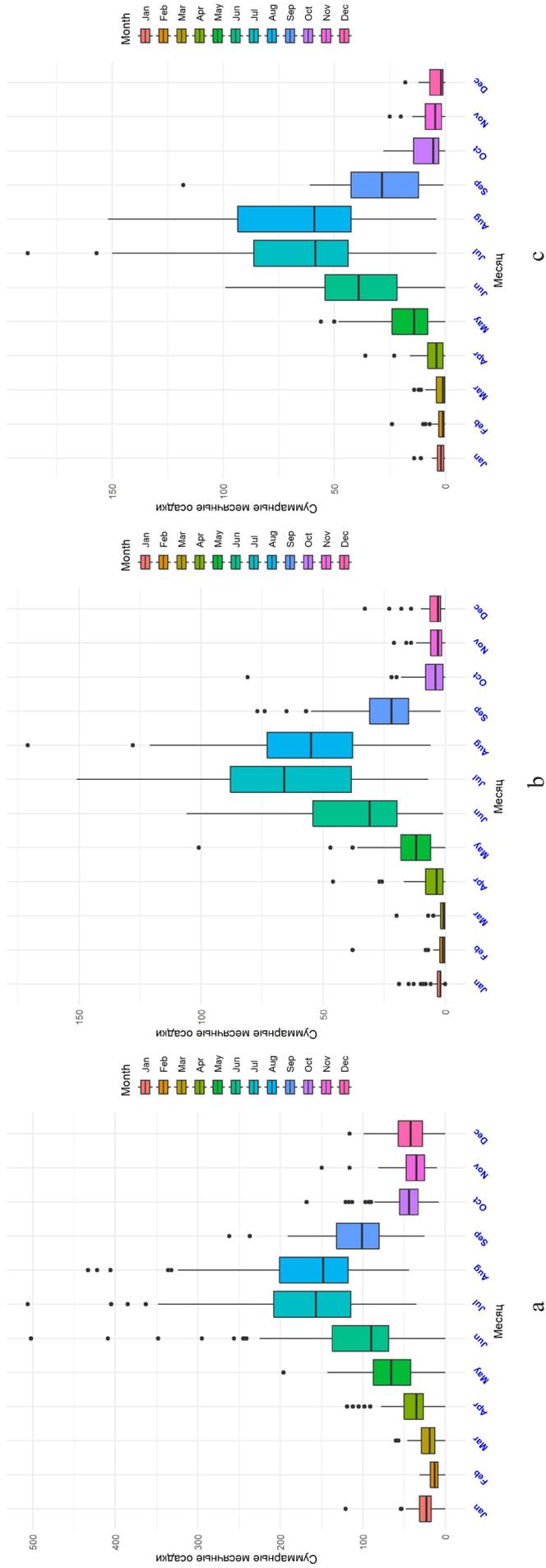


Рис. 2. Годовой ход суммарных месячных осадков по метеостанциям:  
 а – Танхой (1936–2019 гг.), б – Новоселенгинск (1936–2019 гг.), в – Петропавловка (1973–2019 гг.)  
 Fig. 2. Annual course of total monthly precipitation by weather stations:  
 а – Tankhoy (1936–2019), б – Novoselenginsk (1936–2019), в – Petrovavlovka (1973–2019)

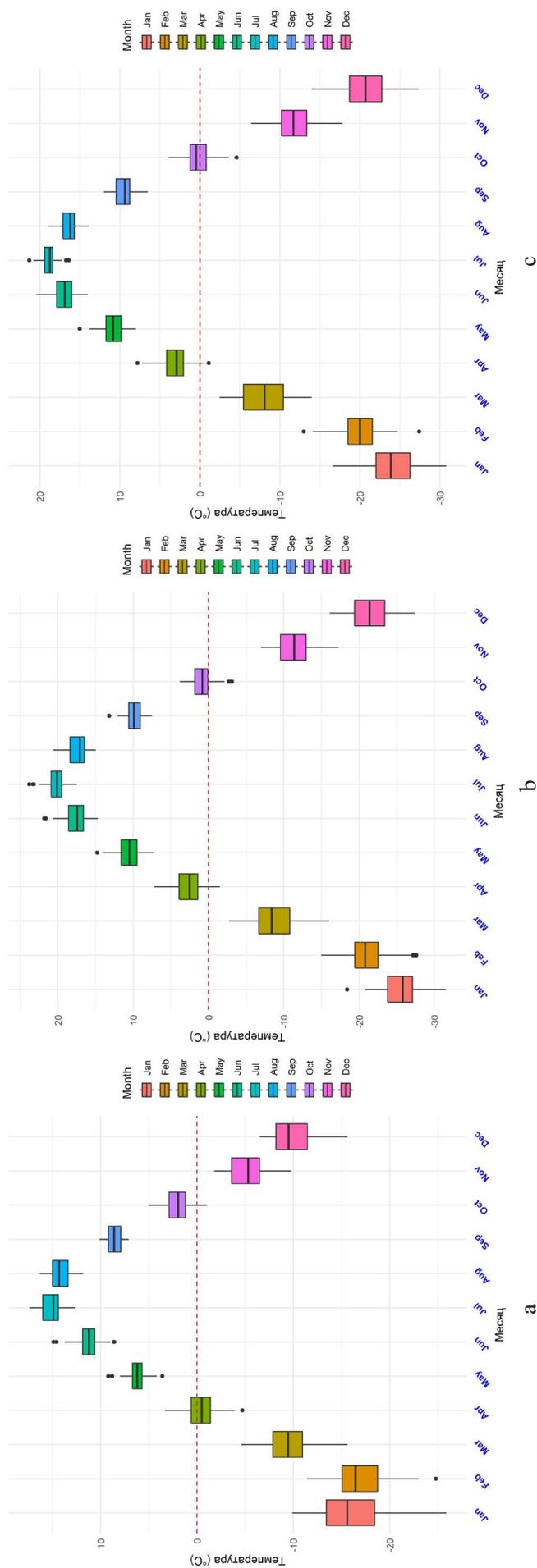


Рис. 3. Годовой ход средних месячных температур по метеостанциям:  
 a – Танхой (1948–2019 гг.), b – Новоселенгинск (1932–2019 гг.), c – Петропавловка (1969–2019 гг.)  
 Fig. 3. Annual variation of average monthly temperatures by weather stations:  
 a – Tankhoi (1948–2019), b – Novoselenginsk (1932–2019), c – Petropravlovka (1969–2019)

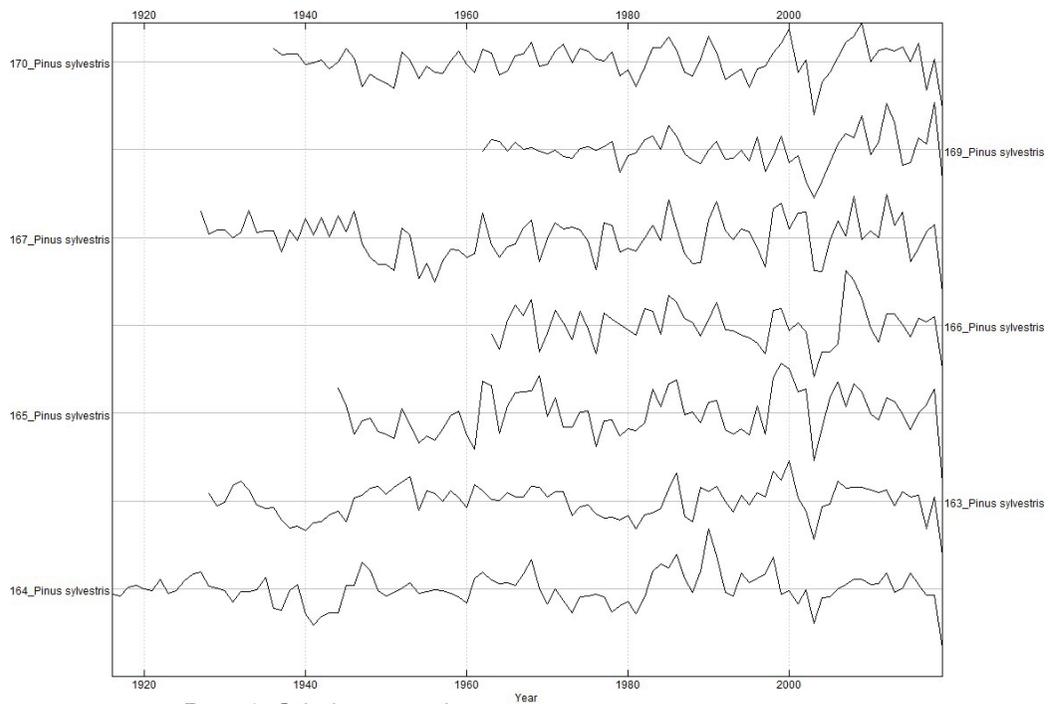


Рис. 4. Обобщенные древесно-кольцевые хронологии  
Fig. 4. Generalized tree-ring chronologies

Таблица 2. Корреляция древесно-кольцевых хронологий  
Table 2. Correlation of tree-ring chronologies

	164	165	166	167	169	170
163	0.60	0.51	0.42	0.26	0.38	0.47
164	1	0.44	0.42	0.28	0.34	0.42
165	0.44	1	0.56	0.69	0.50	0.67
166	0.42	0.56	1	0.65	0.60	0.65
167	0.28	0.69	0.65	1	0.47	0.60
169	0.34	0.50	0.60	0.47	1	0.56
170	0.42	0.67	0.65	0.60	0.56	1

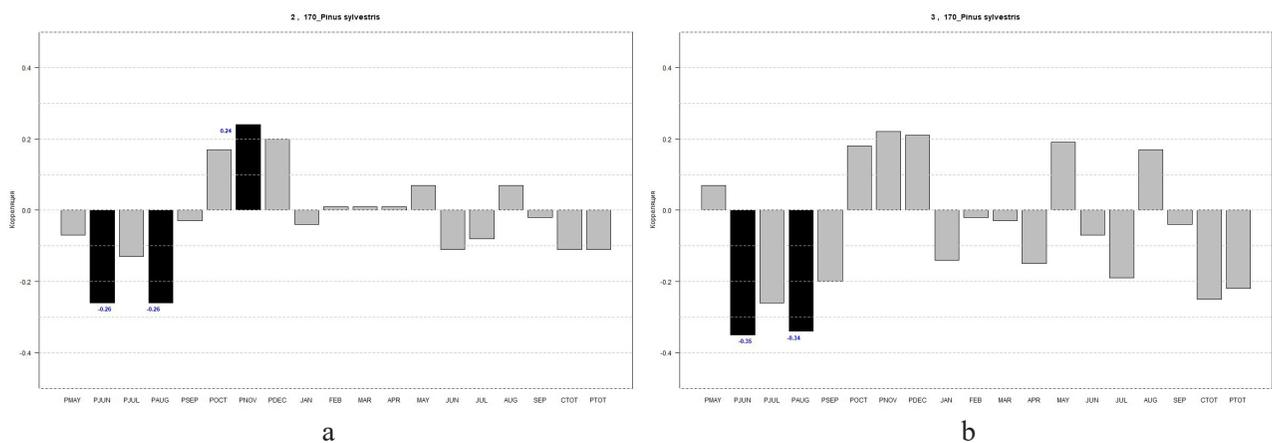


Рис. 5. Корреляции хронологий радиального прироста сосны обыкновенной со средними месячными температурами на 170 площадке: а – пос. Новоселенгинск; б – пос. Петропавловка.

Выделены статистически значимые корреляции  
Fig. 5. Correlations of chronological radial growth in Scots pine with average monthly temperatures at site 170: а – Novoselenginsk settlement; б – Petropavlovka settlement.  
Statistically significant patterns are highlighted

Для местообитаний 164, 166 и, особенно, для 170 была зафиксирована устойчивая тенденция к обратной связи с летней температурой предыдущего года.

### Заключение

На основании проведённого анализа были выявлены закономерности радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Байкальского государственного природного биосферного заповедника. Построены индивидуальные и обобщённые хронологии ширины годовых колец, охватывающие период с 1940 по 2019 годы. Это позволило получить более полное представление о динамике роста сосны обыкновенной. Установлена устойчивая обратная зависимость радиального прироста сосны обыкновенной от температуры предыдущего летнего сезона. Повышенные температуры летом предыдущего года приводят к снижению прироста в текущем году.

Климатические изменения в регионе: рост средней температуры летних месяцев на 2°C и снижение июльских осадков в среднем на 60 мм негативно влияют на сезонный рост сосны, требующей достаточной почвенной влаги в середине и конце лета.

Зафиксированы аномальные спады сезонного вегетационного роста деревьев в 2003 и 2015 годах. Эти спады могут быть обусловлены сильной засухой в начале сезона, а также лесными пожарами, которые происходили в регионе в указанные годы. Их влияние на экосистемы региона требует дальнейшего анализа для более точного понимания их роли в динамике радиального прироста деревьев.

### Список литературы

1. Галазий Г.И. Растительность Хребта Хамар-Дабан. Новосибирск: Наука, 1988. 112 с.
2. Данчева А.В., Залесов С.В., Муканов Б.М. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны в ленточных борах Прииртышья // Лесной вестник. Forestry bulletin. 2020. Т. 24, №2. С. 5–10. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-2-5-10>.
3. Климат и растительность Хамар-Дабана. URL: <https://baikalzapovednik.ru/landscapes> (дата обращения: 9.09.2024).
4. Хорошев А.В., Воловинский И.В., Бочкарев Ю.Н. Ландшафтные и климатические факторы динамики приростов кедра в Северной тайге Западной Сибири // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов / Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Екатеринбург. 2021. С. 21–31. doi: <https://doi.org/10.26170/KFG-2021-03>.
5. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазела В.С., Наурузбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

6. Alfaro R.I., Berg J., Axelson J. Periodicity of western spruce budworm in Southern British Columbia // Forest ecology and management. 2014. Vol. 315. P. 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.026>.

7. Alfaro R.I., Sickle G.V., Thomson A.J., Wegwitz E. Tree mortality and radial growth losses caused by the western spruce budworm in a Douglas-fir stand in British Columbia // Canadian journal of forest research. 1982. Vol. 12, №4. P. 780–787.

8. Black B.A., Shaw D.C., Stone J.K. Impacts of Swiss needle cast on overstory Douglas-fir forests of the western Oregon Coast Range // Forest ecology and management. 2010. Vol. 259, iss. 8. P. 1673–1680. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.047>.

9. Bunn A., Korpela M. dplR: Dendrochronology program library in R // Dendrochronologia, 2008. № 26. P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.

10. Isebrands J.G., Dickson R.E., Rebeck J., Karnosky D.F. Interacting effects of multiple stresses on growth and physiological processes in northern forest trees // Responses of northern U.S. forests to environmental change. New York: Springer, 2000. P. 149–180.

11. Lee E.H., Beedlow P.A., Waschmann R.S., Burdick C.A., Shaw D.C. Tree-ring analysis of the fungal disease Swiss needle cast in Western Oregon coastal forests // Canadian journal of forest research. 2013. Vol. 43, №8. P. 677–690. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0062>.

12. Lee E.H., Beedlow P.A., Waschmann R.S., Tingey D.T., Wickham C., Cline S., Bollman M., Carlile C. Douglas-fir displays a range of growth responses to temperature, water, and Swiss needle cast in western Oregon, USA // Agriculture and forest meteorology. 2016. Vol. 221. P. 176–188.

13. Lloleay A.H., Duffy P.A., Mann D.H. Nonlinear responses of white spruce growth to climate variability in interior Alaska // Canadian journal of forest research. 2013. Vol. 43, №4. P. 331–343. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0372>.

14. R core team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. <https://www.R-project.org/>.

### References

1. Galazij G.I. Rastitel'nost' Hrebta Hamar-Daban [Vegetation of the Khamar-Daban Ridge]. Novosibirsk: Nauka, 1988. 112 p.
2. Dancheva A.V., Zalesov S.V., Mukanov B.M. Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radial'nyj prirost sosny v lentochnyh borah Priirtysh'ya [Influence of climatic factors on the radial growth of pine in ribbon forests of the Irtysh region] // Lesnoj vestnik [Forest herald]. Forestry bulletin. 2020. Vol. 24, No 2. P. 5–10. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-2-5-10>.
3. Klimat i rastitel'nost' Hamar-Dabana. URL: <https://baikalzapovednik.ru/landscapes> (accessed: 9.09.2024).
4. Horoshev A.V., Volovinskij I.V., Bochkarev YU.N. Landshaftnye i klimaticheskie faktory dinamiki prirostov kedra v Severnoj tajge Zapadnoj Sibiri [Landscape and climatic factors in the dynamics of pine growth in the Northern taiga of Western Siberia] // Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Ekaterinburg, 22–24 aprelya 2021 goda [Climatic changes and seasonal dynamics of landscapes: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference.]. Ekaterinburg, 2021. P. 21–31. <https://doi.org/10.26170/KFG-2021-03>.
5. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kiryanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Hantemirov R.M. Metody dendrohronologii. CHast' I. Osnovy dendrohronologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'cevoj informacii [Methods of dendrochronology. Part I. Fundamentals of dendrochronology. Collection and receipt of tree-ring information]. Krasnoyarsk, 2000. 80 p.

6. Alfaro R.I., Berg J., Axelson J. Periodicity of western spruce budworm in Southern British Columbia // *Forest ecology and management*. 2014. Vol. 315. P. 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.026>.

7. Alfaro R.I., Sickle G.V., Thomson A.J., Wegwitz E. Tree mortality and radial growth losses caused by the western spruce budworm in a Douglas-fir stand in British Columbia // *Canadian journal of forest research*. 1982. Vol. 12, No 4. P. 780–787.

8. Black B.A., Shaw D.C., Stone J.K. Impacts of Swiss needle cast on overstory Douglas-fir forests of the western Oregon Coast Range // *Forest ecology and management*. 2010. Vol. 259, iss. 8. P. 1673–1680. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.047>.

9. Bunn A., Korpela M. dplR: Dendrochronology program library in R // *Dendrochronologia*, 2008. No 26. P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

10. Isebrands J.G., Dickson R.E., Rebbeck J., Karnosky D.F. Interacting effects of multiple stresses on growth and physiological processes in northern forest trees // *Responses of northern U.S. forests to environmental change*. New York: Springer, 2000. P. 149–180.

11. Lee E.H., Beedlow P.A., Waschmann R.S., Burdick C.A., Shaw D.C. Tree-ring analysis of the fungal disease Swiss needle cast in Western Oregon coastal forests // *Canadian journal of forest research*. 2013. Vol. 43, No 8. P. 677–690. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0062>.

12. Lee E.H., Beedlow P.A., Waschmann R.S., Tingey D.T., Wickham C., Cline S., Bollman M., Carlile C. Douglas-fir displays a range of growth responses to temperature, water, and Swiss needle cast in western Oregon, USA // *Agriculture and forest meteorology*. 2016. Vol. 221. P. 176–188.

13. Lloyd A.H., Duffy P.A., Mann D.H. Nonlinear responses of white spruce growth to climate variability in interior Alaska // *Canadian journal of forest research*. 2013. Vol. 43, No 4. P. 331–343. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0372>.

14. R core team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. <https://www.R-project.org/>.

### Gusev S.M., Chizhikova N.A. Influence of climate on the radial growth in Scots pine at the territory of the Baikal reserve.

In this article, an analysis was carried out, on the basis of which the patterns of annual radial growth in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on the territory of the Federal State Budgetary Institution «Baikal State Natural Biosphere Reserve» of the Republic of Buryatia were identified. Understanding the relationships between temperature, precipitation, and radial growth allows us to more accurately predict the impacts of climate change on forest ecosystems. The study generated individual and aggregated tree-ring width chronologies, providing a more complete picture of the growth dynamics in this species. Most chronologies covered the period from 1940 to 2019. Radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) had a strong inverse relationship with the temperature of the previous summer: higher temperatures last summer led to reduced radial growth in the current year. That might be due to worsening conditions caused by dry periods or forest fires, which had a negative impact on tree health. In addition, climate data confirmed that the region was experiencing an increase in average summer temperatures by 2°C and a decrease in July precipitation by an average of 60 mm. Those changes might negatively affect the seasonal growth of *Pinus sylvestris* L., as it required sufficient soil moisture in mid- and late summer for normal development. The results highlight the importance of taking climate factors into account when understanding the growth dynamics of *Pinus sylvestris* L.

**Keywords:** dendrochronology; *Pinus sylvestris* L.; annual tree-rings; conifers; dplR.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 05.12.2024

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 27.03.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 07.04.2025

#### Информация об авторах

Гусев Станислав Михайлович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: SMGusev@kai.ru.

Чижикова Нелли Александровна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru.

#### Information about the authors

Stanislav M. Gusev, Postgraduate Student, Kazan (Volga region) Federal University, 18, Kremlyovskaya, Kazan, 420008, Russia, E-mail: SMGusev@kai.ru.

Nelli A. Chizhikova, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan (Volga region) Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru.



R.P. Gorbunov<sup>1,2</sup>, V.V. Alexanov<sup>3</sup>, T.M. Teofilova<sup>4</sup>, V. Langraf<sup>5</sup>,  
I.A. Solodovnikov<sup>6</sup>, R.A. Sukhodolskaya<sup>1,7,8</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences,  
xobglor@gmail.com

<sup>2</sup>«Belogorye» State Reserve; <sup>3</sup>State Budgetary Institution of Kaluga Region «Parks Directorate»

<sup>4</sup>Institute of Biodiversity and Ecosystem Research, Bulgarian Academy of Sciences

<sup>5</sup>Constantine the Philosopher University in Nitra; <sup>6</sup>Vitebsk State University Named after P.M. Masherov

<sup>7</sup>Kazan State Medical University; <sup>8</sup>Volga-Kama State Natural Biosphere Reserve

## VARIATION IN BODY SIZE ALONG GEOGRAPHICAL GRADIENTS IN GROUND BEETLES (THE CASE STUDY IN *CARABUS GRANULATUS* L.)

We tried to clarify Bergmann Rule for ectotherms taking as the model ground beetle *Carabus granulatus*. Carabid beetles are known as a fair and representative group, sensitive to environmental factors, suitable for ecological researches. We sampled beetles by pitfall traps in 8 large regions of Russia and abroad, the territory of investigations lied between 42.8 and 56.8 degrees from South to North and between 17.6 and 86.1 from West to East. In total 6172 specimens we measured by 6 linear traits. Linear and polynomial trends showed that elytra length, elytra width and pronotum width decreased in latitude gradient when using linear regression or showed hump-shaped variation in elytra width – when using polynomial regression. No variation in traits value was revealed in longitude gradient when using linear regression but polynomial regression curves were distinctly U-shaped for head length and distance between eyes in latitude gradient and hump-shaped – in longitude one. Variation in traits diversity (CV) was not significant in any traits. Our studies do not confirm the presence of a direct correlation between the variability of the sizes of individual traits and the variability of their coefficient of variation in the latitudinal gradient, which has been shown for some animals.

**Keywords:** body size variation; Bergman's rule; ground beetles; geographical gradients; morphometrics.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.12.21>

### Introduction

Successful agricultural practice implies stable relationships between all stages of agricultural production. Biotic influences play a huge role in this process. Thus, in multifunctional agroecosystems polyphagous arthropod predators such as carabid beetles are of the most numerous entomo- and zoophages. They can feed on phytophagous, saprophagous, small predacious arthropods and on fungi (Kromp, 1999). Carabids most active and numerous, and able efficiently reduce populations of some pest mites, pest insects: aphids, thrips, coleopterans, sawflies, cicadas, dipterous, and some arthropods such as springtails and slugs (Sunderland, 1975; Kromp, 1999). Being wide spectrum predators, carabids can find food when there are no pests in agrobiocenosis. At that time, especially in spring, they feed on phytophagous and saprophagous arthropods. According to mentioned studies, the carabid beetles are regulating factor of pest population in agrocenoses. It is necessary to know the carabid biodiversity, dominance and the interaction among total agrocenosis components especially in context

of indirect plant protection. In this regard, the study of the morphological features of beetles becomes extremely important. Morphometric measurements in insects are important tools to evaluate variations because the exoskeleton can be easily measured and physical distortions rarely occur as in the soft parts of other animal groups (Thiago, 2011). The analysis of their shape and size should be one of the earliest parameters to be established before other factors are examined (Adams, Rolhf, 2000). For an agricultural production, monitoring one of the main predators of pests is extremely important, especially when its productivity relies on the ecological services provided by these insects. Slight differences in their morphometric characteristics are one of many indications on the possible effects of the local environmental conditions, climatic situation and gene pool on the carabids (Inward et al., 2011). This could further impact their life cycle, reproduction and general behavior (Den Boer, 1986; Matalin, 2007; Sukhodolskaya, Saveliev, 2016).

The body size of animals is considered an inte-

grative trait related to many life processes (ontogeny, sexual selection, fertility, availability and quality of resources) (Fedorenko, 2007). Studies of morphometric variability allow for the assessment of the influence of environmental factors on the structure and dynamics of populations. Ground beetles (Coleoptera, Carabidae), due to their high abundance, integrative nature concerning various environmental parameters, and relatively well-studied biology, are used as a model group in such research (Grinko, 2002; Timofeeva, 2010; Sukhodolskaya, Saveliev, 2016).

The family Carabidae (Coleoptera) is considered one of the most representative and progressive among insects. Their large species richness, high proportion in beetles' communities, trophic characteristics (most species are predators), and sensitivity to various impacts make carabids good indicators of the environment. Numerous studies have been conducted at the community level (Kotze et al., 2011). Intra-specific variability of morphometric traits in carabids across environmental gradients has been studied to a lesser extent. For warm-blooded organisms, Bergmann's rule states that body size increases towards higher latitudes (Blackburn et al., 1999). This pattern is observed in many endotherms and some ectotherms (Blanckenhorn et al., 2006; Stillwell et al., 2007; Stillwell, 2010). Since the surface-to-volume ratio generally decreases with increasing body size, this trait plays an important role in thermoregulation for endotherms and resistance to starvation and desiccation for ectotherms.

Clinal variability in size among arthropods often follows the reverse of Bergmann's rule. In univoltine species that overwinter only in a specific developmental stage, the development time is limited by the ambient temperature. Thus, a decrease in body size can be explained by a reduction in development time, resulting in smaller sizes. Therefore, the reverse of Bergmann's rule is considered a result of climatic adaptation in univoltine arthropods (Masaki, 1967; Mousseau, 1997). At the same time, data have been obtained showing that ectotherms may follow the direct Bergmann's rule (Atkinson, 1995; Ray, 1960). Thus, the question of whether body size variability adheres to Bergmann's rule remains contentious (Sota et al., 2000; Blanckenhorn, Demont, 2004). Previous studies on the ground beetle species *Carabus granulatus* (L.) have shown a decrease in body size (Filippov, 2008; Sukhodolskaya, Saveliev, 2016) or a lack of pattern (Sukhodolskaya, Saveliev, 2017).

From a macroecological perspective, the analysis of a trait such as body size should include large-scale assessments using modern statistical methods to mitigate random deviations observed in individual cases

(Chown, Gaston, 2009). The aim of this study is to assess the variation of the metric traits of the ground beetle *C. granulatus* along latitudinal and longitudinal gradients. Similar studies have been previously conducted for this species (Sukhodolskaya, Saveliev, 2014; Aleksanov et al., 2023), but with a smaller coverage of latitudinal and longitudinal gradients, highlighting the need for further researches.

So, in this study, based on our investigations, we asked two questions: (i) what kind of Bergmann clines does *C. granulatus* follow? and (ii) What is the variation of its body size in each of the studied latitude/longitude points?

### Material and methods

The material for this study was collected in 8 large regions at different biotopes in the period 2010–2020. Sampling of the ground beetles was carried out using pitfall traps. A total of 6172 beetle specimens were examined and measured.

*Object of Study.* *C. granulatus* is a large beetle 18–26 mm in length, with a bronze or copper-colored upper surface, often with a green sheen, and sometimes bronze-black. The femora are sometimes red. The pronotum is uniformly densely punctate. The antennae are long, reaching halfway along the elytra in males. The elytra are sinuate before the apex with elytral eripleura abruptly near upper edge of sinuation and have a sharp sculpture consisting of ridges and chains of tubercles. The pits on the elytra are small and barely noticeable (Hurka, 1996; Isaev et al., 2004).

This species is hygrophilous, eurytopic, with Transpalearctic distribution throughout the Eurasian continent from lowlands to mountains. It inhabits riparian ecosystems or moist floodplain meadows with dense vegetation. The species has a one-year life cycle; in the northern taiga, it is found only in meadows, while in floodplain forests, its occurrences are rare (Shelomi, 2012). In more southern regions, this preferring moisture species is noted in moist to wet forests, especially floodplain (Turin, 2003; Fedorenko, 2007). In general, it is a spring breeder without larval, but with an obligatory adult diapause (Turin, 2003). It hibernates, often gathering in groups, under loose bark of trees. Both beetles and larvae are predators. The larva moults three times before pupation, and in the laboratory, beetles have been successfully reared from eggs in 53 days.

Studies of this species (Sukhodolskaya, Saveliev, 2014) have shown that beetles are larger in urbanized habitats. Among various natural habitats, beetles also differ in size: for example, they are smaller in linden forests and larger in birch forests. However, changes typically affected specific metric parameters.

Table 1. Regions of sampling plots and sample sizes

№	Region	Latitude	Longitude	Number of plots	Sample size, ind.
1	Bulgaria	42.8°N	22.9°E	1	94
2	Slovakia	47.8°N	17.6°E	3	142
3	Kaluga Oblast <sup>a</sup>	54°N	36°E	8	2872
4	Belarus	55.2°N	30.2°E	1	131
5	Kemerovo Oblast <sup>a</sup>	55.3°N	86.1°E	3	207
6	Tatarstan Republic <sup>a</sup>	55.7°N	49.1°E	12	2370
7	Mari El Republic <sup>a</sup>	56.6°N	47.1°E	2	214
8	Udmurtia Republic <sup>a</sup>	56.85°N	53.20°E	1	142

<sup>a</sup> Russian Federation.

**Sampling regions.** Material from the Republic of Tatarstan was collected during the period from 2010 to 2020. Specimens from other regions were kindly provided by our colleagues from the Republic of Udmurtia, Mari El, Kemerovo Oblast, Kaluga Oblast, Belarus, Bulgaria, and Slovakia as part of agreements for scientific research. The collection sites of the beetles are shown in Table 1.

**Research Technique.** After sampling the beetles and determining their species and sex, all individuals were photographed, and their parameters were measured using a custom program by Python 2.7 with the libraries numpy and OpenCV. The program is necessary to achieve greater measurement accuracy, automate the process, and reduce subjectivity (Mukhametnabiev, 2018). The scheme for measuring the beetles is presented in Figure 1.

**Statistical analysis.** In the framework of statistical processing, the arithmetic mean, standard deviation, standard error, and coefficient of variation ( $CV = \sigma/\mu \cdot 100$ ) were calculated. We created graphs with linear ( $y=mx+b$ ) and second order polynomial ( $y=ax^2+bx+c$ ) trend lines using Excel.

## Results

As a result of the measuring 6 morphometric traits, we obtained results displayed in Figures 2–5, and in Table 2 (we did not mark the standard errors on graphs in cases where it was negligible).

At first, we should describe the distribution of the number of study points: the most of them are concentrated at 54–56 degrees N. In terms of longitude, the greatest number of collections was made at about 35 and 50 degrees E. This affects both the accuracy of the trend lines and the need for cautious interpretation of the data.

The change in the mean length of the elytra ranged around 3 mm. Figures 2 and 3 show the distribution of values along latitudinal and longitudinal gradients. The overlay of the regression line reveals

a weak trend of decreasing elytra length with a low coefficient of determination (0.21–0.24).

The values of the coefficient of variation (CV) for the length of the elytra in the latitudinal and longitudinal gradients (fig. 4, 5) change within 5%. The regression line does not show significant changes when moving north or east.

The range of fluctuation in the mean values of the elytra width in the latitudinal gradient from different regions was about 3 mm. The overlay of the regression line indicates a trend of decreasing elytra width to the north, with a coefficient of determination of 0.3. At 55–57 degrees N, the values split into two groups: 2.8–3.5 mm and 4.8–5.5 mm, likely influenced by some factor. A trend towards decreasing elytra width is suggested, necessitating an exploration of the reasons for the divergence in the data set.

The change in the width of the elytra in the longitudinal gradient, as well as the coefficient of variation in both gradients showed no consistent distribution patterns. The values of the coefficient of variation fluctuated within about 2%.

All measured values of the length of the pronotum (absolute values and CV) in both latitudinal and

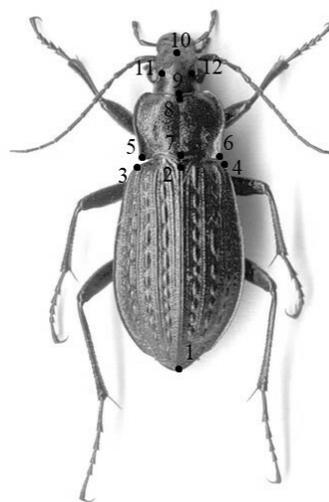


Fig. 1. Illustration of measurements: 1–2 – elytra length, 3–4 – elytra width, 5–6 – pronotum width, 7–8 – pronotum length, 9–10 – head length, 11 – 12 – distance between the eyes

Author of the original photo: Komarov P.  
(<https://www.zin.ru/animalia/coleoptera/rus/car-graek.htm>)

Table 2. Traits' linear and polynomial regression coefficients, along with the forms of the trend curves

Traits	Linear R <sup>2</sup> lat.	Linear R <sup>2</sup> long.	Poly. R <sup>2</sup> lat.	Poly. R <sup>2</sup> long.	Linear CV R <sup>2</sup> lat.	Linear CV R <sup>2</sup> long.	Poly. CV R <sup>2</sup> lat.	Poly. CV R <sup>2</sup> long.
El. l.	0.24	0.21	0.24 -	0.25 U	0.1	0.04	0.19 U	0.05 U
El. w.	0.3	0.06	0.39 ∩	0.34 U	0.005	0.02	0.007 U	0.06 ∩
Pr. l.	0.04	0.07	0.075 U	0.07 ∩	0.09	0.1	0.125 ∩	0.127 ∩
Pr. w.	0.26	0.32	0.27 -	0.33 -	0.045	0.12	0.06 ∩	0.12 -
H. l.	0.16	0.02	0.4 U	0.34 ∩	0.08	0.2	0.12 ∩	0.2 U
D. b. e.	0.07	0.02	0.35 U	0.16 ∩	0.05	0.23	0.14 ∩	0.23 -

Abbreviations: Poly. – polynomial regression curve, lat. – latitudinal gradient, long. – longitudinal gradient, El. l. –elytra length, El. w – elytra width, Pr. l. – pronotum length, Pr. w. – pronotum width, H. l. – head length, D. b. e. – distance between eyes, «-» – approximately linear curve, «U» – U-shaped curve, «∩» – hump-shaped curve.

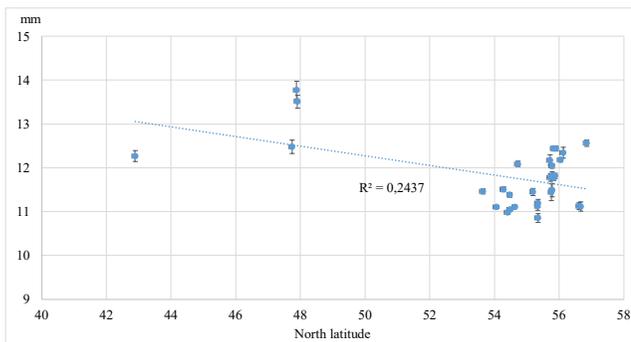


Fig. 2. Elytra length variation in *C. granulatus* in latitudinal gradient with linear trend line

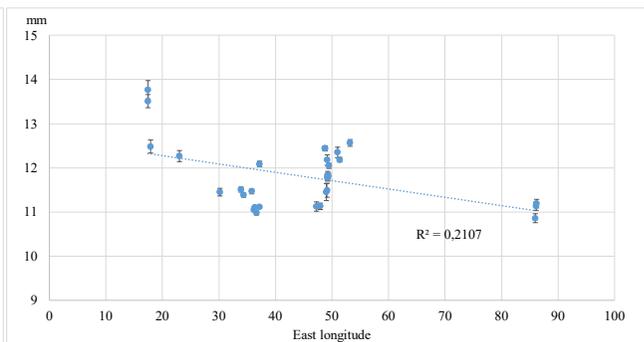


Fig. 3. Elytra length variation in *C. granulatus* in longitudinal gradient with linear trend line

longitudinal contexts showed a slight visual trend towards decreasing values in the direction of north/east. However, the overlay of the regression line does not confirm the statistical significance of these patterns ( $R^2=0.04-0.10$ ).

The calculation of the linear regression reveals a trend of decreasing the width of the pronotum with increasing latitude and longitude. The coefficient of determination for the regression lines was 0.26 for the latitudinal gradient and 0.32 for the longitudinal gradient. The coefficient of variation for the width of the pronotum did not change significantly ( $R^2=0.045$  and 0.12).

The distribution of head length values is described by a second-order polynomial regression curve (U-shaped) with a coefficient of determination of 0.4. This indicates that the head length of the beetles decreases in the middle (48–50 degrees) of the studied latitudinal range (43–57 degrees) and increases at its

edges. In the longitudinal gradient, the distribution of head length values shows an inverse relationship. The hump-shaped curve described by the second-order regression has a significance level of  $R^2=0.34$ .

The coefficient of variation for head length in the latitudinal gradient does not show significant patterns, while in the longitudinal gradient, there is a weak tendency to decrease.

The distribution of the distance between the eyes in the latitudinal gradient also exhibits a U-shaped curve, albeit with a slightly lower level of significance: 0.35. In the longitudinal gradient no patterns are observed. Such characteristics of the changes in head length and distance between the eyes suggest the presence of a selective factor acting on them, different from that affecting the elytra and pronotum.

The coefficient of variation for the distance between the eyes in the latitudinal gradient did not have a significant trend line ( $R^2=0.05$ ). In the longitudinal

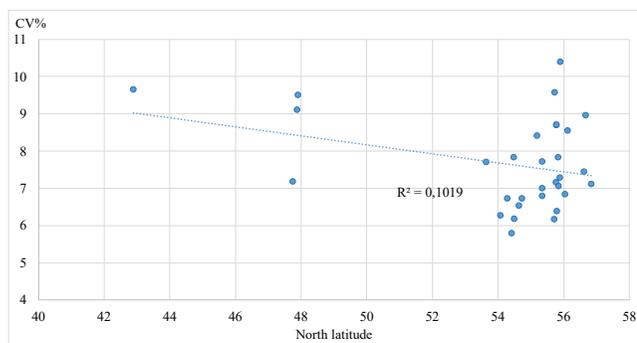


Fig. 4. Coefficient of variation (CV) of elytra length in *C. granulatus* in latitudinal gradient with linear trend line

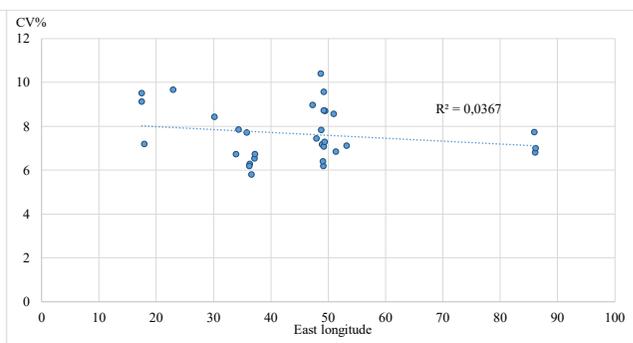


Fig. 5. Coefficient of variation (CV) of elytra length in *C. granulatus* in longitudinal gradient with linear trend line

gradient, there is a weak tendency to decrease variation in sizes, with a coefficient of determination of 0.23.

Overall, it should be noted that the morphometric traits of the elytra and pronotum exhibited weak and unreliable trends toward decreasing sizes in the northern and eastern directions. Head length and distance between the eyes showed a relatively more reliable (but still weak) U-shaped distribution of values in the latitudinal direction. In the longitudinal direction, head length had a weak hump-shaped distribution, while the distance between the eyes showed no significant changes. The coefficient of variation for the measured parameters also tended to decrease in both latitudinal and longitudinal directions, but on average had much lower values of the coefficient of determination ( $R^2$ ) for the trend line.

Finally, linear and polynomial trends showed that three traits in *C. granulatus* (elytra length, elytra width and pronotum width) decreased in latitude gradient when using linear regression or showed hump-shaped variation in elytra width – when using polynomial regression. No variation in traits value was revealed in longitude gradient when using linear regression but polynomial regression curves were distinctly U-shaped for head length and distance between eyes in latitude gradient and hump-shaped – in longitude one.

Variation in traits diversity (CV) was not significant in any traits as in latitude gradient and longitude one as well.

## Discussion

The issue of size variation in geographic gradients has been studied for a long time (Geraghty et al., 2007; Harris et al., 2012), and if for the endotherms this phenomenon is well illustrated by birds and mammals, for the ectotherms the problem of the mechanisms of size variability in latitudinal-longitudinal gradients remains unsolved. For such a large and ecologically important class as insects, it has

been shown that Bergmann clines occur along with anti-Bergmann clines, as well as U-shaped clines (Shelomi, 2012; Vinarskiy, 2013). Taxon-specificity of the manifestation of both size variation and CV variability is described in some works (Kaspari et al., 2024). It should be mentioned here that the authors conducted the study on material consisting of different groups of invertebrates and caught at different times and in different ways.

Although many authors note that in order to identify latitude-longitude clines, one should be very careful in choosing not only the research methodology, but also the object: different body parts may be more or less likely to change size in response to different variables (Shelomi, 2023). In addition, the cited work did not include such a diverse and rich in species family as the ground beetles. Ground beetles are a necessary element of almost any terrestrial cenosis, and it is believed that they are an ideal model object for conducting research on the mechanisms of morphometric variability (Koivula, 2011; Sukhodolskaya et al., 2018).

It cannot be said that there are no works on the variability of the size of ground beetles in geographic gradients. But given that studies of this kind require a fairly large sample collected in the relevant regions, our study continues the work of researchers, which they have begun many years ago. Thus, it was shown that the size variation curve in ground beetles of the genus *Pterostichus* was saw-shaped (Luzyanin et al., 2022) with an increase in the length of the elytra and the width of the pronotum, and with a decrease in the head parameters along the latitudinal gradient. As for the species of the genus *Carabus*, there are significantly fewer works.

In this regard, our results partially correlate with the work of Sukhodolskaya & Saveliev (Sukhodolskaya, Saveliev, 2014), where the length of the elytra in *C. granulatus* did not change in the latitudinal gradient. However, there were only 3 regions in that analysis. In another work on the latitudinal variation

of the sizes of *C. granulatus*, ANOVA showed a significant effect of the region of habitat on the studied traits of that species (Sukhodolskaya, Saveliev, 2017). Other study of the genus *Carabus* showed similar results with a decrease in the length of the elytra towards higher latitudes (Sukhodolskaya, Saveliev, 2016). The results of the size variation of ground beetles of the genus *Carabus* in the altitudinal gradient are especially indicative. Studies were carried out at two distanced mountain ridges. In both cases, in two *Carabus* species, the body size monotonically decreased along altitude gradient (Sukhodolskaya et al., 2021; Ananina et al., 2022).

Although there are numerous explanations for patterns of latitude-related variation in insect body size, the mechanisms responsible for intraspecific geographic variation in body size are not well known. Patterns and mechanisms of body size variation are often conflated, leading to some degree of confusion (Blackburn et al., 1999). Here, we have described patterns of intraspecific size variation of ground beetle *C. granulatus*; the associated drivers and mechanisms are yet to be determined.

Our results show that the largest beetles (with elytra length as a proxy) have been registered at the center of the studied latitudinal gradient and at the western part of the longitudinal one (47°N, 17.5°E; mean = 13.8 mm), while the smallest beetles belonged to the both higher latitudes and longitudes (55.3°N, 86°E; mean = 10.8 mm). Thus, empirically we could suggest that individuals of the *C. granulatus* tend to be smaller towards North-East across the Center-Eastern Palearctic region. Nevertheless, unreliable ( $R^2 < 0.4$ ) regression trend lines make us assume that either there is no significant correlation or resulting dataset has mixed data, influenced by various environmental drivers, requiring further statistical analysis.

## References

1. Aleksanov V.V., Sukhodolskaya R.A., Gordienko S.S. Morfometricheskaya struktura populyatsiy zhuzhelitsy *C. granulatus* v vostochnykh rayonakh Kaluzhskoy oblasti [Morphometric structure of the populations of the ground beetle *C. granulatus* in the eastern regions of the Kaluga region] // Yestestvennonauchnyye issledovaniya v Chuvashii i sopredel'nykh regionakh [Natural Science Research in Chuvashia and Neighboring Regions] / Materialy mezhhregional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Iss. 9. Cheboksary: Plakat, 2023. P. 9–13.
2. Vinarskiy M.V. O primenimosti pravila Bergmana k ekotermnym organizmam: sovremennoye sostoyaniye problem [On the applicability of Bergmann's rule to ectothermic organisms: current state of the problem] // Journal of general biology. 2013. Vol. 74, No 5. P. 327–339.
3. Grinko R.A. Dinamika ekologicheskoy struktury populyatsiy zhuzhelits zonalnykh i intrazonalnykh ekosistem pri raznoy stepeni ikh izolatsii [Dynamics of the ecological structure of ground beetle populations in zonal and intrazonal ecosystems

- with varying degrees of isolation]: PhD (Cand. of Biol.). Nizhny Novgorod, 2002. 217 p.
4. Isayev A.Yu., Egorov L.V., Egorov L.A. Zhestkokrylye (Insecta, Coleoptera) lesostepi Srednego Povolzh'ya [Coleoptera (Insecta, Coleoptera) of the forest-steppe of the Middle Volga]. Ulyanovsk: UIGU, 2004. 72 p.
5. Timofeeva G.A. Morfometricheskaya struktura populyatsiy zhuzhelits (Coleoptera, Carabidae) v antropogennykh landshaftakh [Morphometric structure of ground beetle populations (Coleoptera, Carabidae) in anthropogenic landscapes]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) Kazan, 2010. 20 p.
6. Fedorenko D.N. Fauna zhuzhelits (Coleoptera, Carabidae) Moskovskoy oblasti [Fauna of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of the Moscow region] // Nasekomye Moskovskoy oblasti. Problemy kadastra i okhrany [Insects of the Moscow region. Problems of inventory and conservation]. Moscow: Nauka, 2007. P. 20–46.
7. Filippov B.Yu. Puti adaptatsii i ekologicheskie zakonomernosti osvoeniya zhuzhelitsami (Coleoptera, Carabidae) severa Russkoy ravniny [Paths of adaptation and ecological patterns of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in the north of the Russian plain]: DSc (Dr. of Biol) thesis. Moscow, 2008. 367 p.
8. Sharova I.Kh., Filippov B.Yu. Ekologiya zhuzhelits lesov v delte Severnoy Dviny. Arkhangel'sk [Ecology of ground beetles in the forests of the Northern Dvina delta]. Arkhangel'sk: Pomorskiy gosudarstvennyy universitet, 2004. 116 p.
9. Adams D.C., Rolhf F.J. Ecological character displacement in plethodon: biomechanical differences found from geometric morphological study // Proceedings of the Natural Academy of Sciences. 2000. Vol. 97, No 8. P. 4106–4111.
10. Ananina T.L., Sukhodolskaya R.A., Gordienko T.A., Savelyev A.A. Body shape variation in *Carabus odoratus* Shil., 1996 at Barguzin ridge (Northern Baikal region) // Russian journal of applied ecology. 2022. No 3. P. 4–11. doi: 10.24852/2411-7374.2022.3.4.12.
11. Atkinson D. Effects of temperature on the size of aquatic ectotherms: Exceptions to the general rule // Journal of thermal biology. 1995. Vol. 20, iss. 1–2. P. 61–74. doi: 10.1016/0306-4565(94)00028-H.
12. Bergmann C. Ueber die verhältnisse der wärmeökonomie der thiere zu ihrer grösse // Gottinger studien. 1847. Vol. 3. P. 595–708.
13. Blackburn T.M., Gaston K.J., Loder N. Geographic gradients in body size: a clarification of Bergmann's rule // Diversity and distributions. 1999. Vol. 5, iss. 4. P. 165–174. doi: 10.1046/j.1472-4642.1999.00046.x.
14. Blanckenhorn W.U., Demont M. Bergmann and Converse Bergmann Latitudinal Clines in Arthropods: Two Ends of a Continuum? // Integrative and comparative biology. 2004. Vol. 44, iss. 6. P. 413–424. doi: 10.1093/icb/44.6.413.
15. Blanckenhorn W.U., Stillwell, R.C., Young K.A., Fox C.W., Ashton K.G. When Rensch meets Bergmann: does sexual size dimorphism change systematically with latitude? // Evolution. 2006. Vol. 60, iss. 10. P. 2004–2011. doi: 10.1111/j.0014-3820.2006.tb01838.x.
16. Chown S.L., Gaston K.J. Body size variation in insects: a macroecological perspective // Biological Reviews. 2009. Vol. 85, iss. 1. P. 139–169. doi: 10.1111/j.1469-185X.2009.00097.x.
17. Den Boer P.J. Carabids as objects of study // Carabid beetles, their adaptations and dynamics. Stuttgart: Gustav Fischer, 1986. P. 539–551.
18. Dial K.P., Greene E., Irschick D.J. Allometry of behavior // Trends in ecology & evolution. 2008. Vol. 23, iss. 7. P. 394–401.
19. Geraghty M.J., Dunn R.R., Sanders N.J. Body size, colony size, and range size in ants (Hymenoptera: Formicidae): are patterns along elevational and latitudinal gradients consistent

- with Bergmann's rule // *Myrmecological news*. 2007. Vol. 10. P. 51–58.
20. Harris R., McQuillan P., Hughes L. Patterns in body size and melanism along a latitudinal cline in the wingless grasshopper, *Phaulacridium vittatum* // *Journal of biogeography*. 2012. Vol. 39, iss. 8. P. 1450–1461. doi: 10.1111/j.1365–2699.2012.02710.x.
21. Hurka K. Carabidae of the Czech and Slovak Republics. Zlin: Kabourek, 1996. 565 p.
22. Inward D.J.G., Davies R.G., Pergande C., Denham A.J., Volger A.P. Local and regional ecological morphology of dung beetle assemblages across four biogeographic regions // *Journal of biogeography*. 2011. Vol. 38, iss. 9. P. 1668–1682. doi: 10.1111/j.1365–2699.2011.02509.x.
23. Kaspari M., Marshall K.E., Weiser M.D., Siler C.D., Theriot M.K., de Beurs K. Geographic gradients in a functional trait: Drivers of body size and size diversity of ground invertebrate communities // *Ecosphere*. 2024. Vol. 15, iss. 3. doi: 10.1002/eecs2.4785.
24. Koivula M.J. Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reflecting environmental conditions // *ZooKeys*. 2011. Iss. 100. P. 287. doi: 10.3897/zookeys.100.1533.
25. Kotze D.J., Brandmayr P., Casale A., Dauffy–Richard E., Dekoninck W., Koivula M.J., Lövei G.L., Mossakowski D., Noordijk J., Paarmann W., Pizzolotto R., Saska P., Schwerk A., Serrano J., Szyszko J., Taboada A., Turin H., Venn S., Vermeulen R., Zetto T. Forty years of carabid beetle research in Europe – from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation // *Zookeys*. 2011. Iss. 100. P. 55–148. doi: 10.3897/zookeys.100.1523
26. Kromp B. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement // *Agriculture, ecosystems and environment*. 1999. Vol. 74, iss. 1–3. P. 187–228.
27. Luzyanin S., Saveliev A., Ukhova N., Vorobyova I., Solodovnikov I., Anciferov A., Shagidullin R., Teofilova T., Nogovitsyna S., Brygadyrenko V., Alexanov V., Sukhodolskaya R. Modeling sexual differences of body size variation in ground beetles in geographical gradients: a case study of *Pterostichus melanarius* (Illiger, 1798) (Coleoptera, Carabidae) // *Life*. 2022. Vol. 12, iss. 1. P. 112. doi: 10.3390/life12010112.
28. Masaki S. Geographic variation and climatic adaptation in a field cricket (Orthoptera: Gryllidae) // *Evolution*. 1967. Vol. 21, No 4. P. 725–741. doi: 10.2307/2406770
29. Matalin A.V. Typology of the life cycles of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of the western Palearctic // *Entomological review*. 2007. Vol. 87. P. 947–972.
30. Mousseau T.A. Ectotherms follow the converse to Bergmann's rule // *Evolution*. 1997. Vol. 51, No 2. P. 630–632. doi: 10.2307/2411138
31. Mukhametnabiev T. Manual Carabid morphometric measurement for method by Sukhodolskaya // URL: <https://github.com/CRTmatrix/-Manual-Carabidmorphometric-measurement-for-method-by-Sukhodolskaya> (accessed 10.11.2024).
32. Ray C. The application of Bergmann's and Allen's rules to the poikilotherms // *Journal of morphology*. 1960. Vol. 106, iss. 1. P. 85–108. doi: 10.1002/jmor.1051060104.
33. Sunderland K.D. The diet of some predatory arthropods in cereal crops // *Journal of applied ecology*. 1975. Vol. 12, No 2. P. 507–515. doi: 10.2307/2402171.
34. Shelomi M. Where are we now? Bergmann's rule sensu lato in insects // *The American naturalist*. 2012. Vol. 180, No 4. P. 511–519. doi: 10.1086/667595.
35. Shelomi M., Meri S. A practical guide to collection-based research on ecogeographic rules // *Ecology and evolution*. 2023. Vol. 13, iss. 6. doi: 10.1002/ece3.10211.
36. Sota T., Takami Y., Kubota K., Ujiie M., Ishikawa R. Interspecific body size differentiation in species assemblages of the carabid subgenus *Ohomopterus* in Japan // *Population ecology*. 2000. Vol. 42. P. 279–291. doi: 10.1007/PL00012006.
37. Stillwell R.C., Morse G.E., Fox C.W. Geographic variation in body size and sexual size dimorphism of a seed feeding // *American naturalist*. 2007. Vol. 170, No 3. P. 358–369. doi: 10.1086/520118.
38. Stillwell R.C. Are latitudinal clines in body size adaptive? // *Oikos*. 2010. Vol. 119, iss. 9. P. 1387–1390. doi: 10.1111/j.1600–0706.2010.18670.x.
39. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A. Effects of ecological factors on size-related traits in the ground beetle *Carabus granulatus* L. (Coleoptera, Carabidae) // *Russian journal of ecology*. 2014. Vol. 45. P. 414–420. doi: 10.1134/S1067413614050142.
40. Sukhodolskaya R., Saveliev A. Body size variation in Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae) in latitude gradient // *Periodicum biologorum*. 2016. Vol. 118, iss. 3. P. 273–278. doi: 10.18054/pb.2016.118.3.3918.
41. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A. Geographical variation of sexual size dimorphism of the ground beetle *Carabus granulatus* L. (Coleoptera, Carabidae) // *Russian journal of applied ecology*. 2017. No 4. P. 3–10.
42. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A., Gordienko T.A., Vavilov D.N. Sexual size dimorphism in Ground Beetles and its modeling in latitude gradient // *GSC biological and pharmaceutical sciences*. 2018. Vol. 3, iss. 1. P. 11–18. doi: 10.30574/gscbps.2018.3.1.0009.
43. Sukhodolskaya R.A., Vavilov D.N., Gordienko T.A., Mukhametnabiev T.R. Variability of assemblage structure and body sizes in the ground beetles (Coleoptera, Carabidae) along an anthropogenic impact gradient // *Biology bulletin*. 2020. Vol. 48, iss. 10. P. 1777–1784. doi: 10.35885/1684–7318–2020–1–99–114.
44. Sukhodolskaya R., Ananina T., Avtaeva T., Saveliev A. Sexual size dimorphism in ground beetles and its variation in altitude gradient // *Advances in medicine and biology*. 2021. Vol. 191.
45. Thiago M.A., Fernanda F.S., Marconi S.S. Analysis of morphometry and dimorphism in *Enhydrus sulcatus* (Wiedeman, 1821) (Coleoptera: Gyrinidae) // *Neotropical biology and conservation*. 2011. Vol. 6, iss. 3. P. 178–186. doi: 10.4013/nbc.2011.63.05.
46. Turin H. The genus *Carabus* in Europe: a synthesis. Sofia–Moscow: Pensoft, 2003. 511 p.

## Список литературы

- Алексанов В.В., Суходольская Р.А., Гордиенко С.С. Морфометрическая структура популяций жужелицы *C. granulatus* в восточных районах Калужской области // *Естественнонаучные исследования в Чувашии и сопредельных регионах / Материалы межрегиональной научно-практической конференции*, вып. 9. Чебоксары: Плакат, 2023. С. 9–13.
- Винарский М.В. О применимости правила Бергмана к эктотермным организмам: современное состояние проблемы // *Journal of General Biology*. 2013. Т. 74, №5. С. 327–339.
- Гринько Р.А. Динамика экологической структуры популяций жужелиц зональных и интразональных экосистем при разной степени их изоляции: Дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2002. 217 с.
- Исаев А.Ю., Егоров Л.В., Егоров Л.А. Жесткокрылые (Insecta, Coleoptera) лесостепи Среднего Поволжья. Ульяновск: УлГУ, 2004. 72 с.
- Тимофеева Г.А. Морфометрическая структура популя-

- ций жужелиц (Coleoptera, Carabidae) в антропогенных ландшафтах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2010. 20 с.
6. Федоренко Д.Н. Фауна жужелиц (Coleoptera, Carabidae) Московской области // Насекомые Московской области. Проблемы кадастра и охраны. М.: Наука, 2007. С. 20–46.
7. Филиппов Б.Ю. Пути адаптации и экологические закономерности освоения жужелицами (Coleoptera, Carabidae) севера Русской равнины: Дисс. ... докт. биол. наук. М., 2008. 367 с.
8. Шарова И.Х., Филиппов Б.Ю. Экология жужелиц лесов в дельте Северной Двины. Архангельск: Поморский государственный университет, 2004. 116 с.
9. Adams D.C., Rolhf F.J. Ecological character displacement in plethodon: biomechanical differences found from geometric morphological study // Proceedings of the Natural Academy of Sciences. 2000. Vol. 97, №8. P. 4106–4111.
10. Ananina T.L., Sukhodolskaya R.A., Gordienko T.A., Savelyev A.A. Body shape variation in *Carabus odoratus* Shil., 1996 at Barguzin ridge (Northern Baikal region) // Russian journal of applied ecology. 2022. №3. P. 4–11. doi: 10.24852/2411–7374.2022.3.4.12
11. Atkinson D. Effects of temperature on the size of aquatic ectotherms: Exceptions to the general rule // Journal of thermal biology. 1995. Vol. 20, iss. 1–2. P. 61–74. doi: 10.1016/0306–4565(94)00028–H.
12. Bergmann C. Ueber die verhältnisse der wärmeökonomie der thiere zu ihrer grösse // Gottinger studien. 1847. Vol. 3. P. 595–708.
13. Blackburn T.M., Gaston K.J., Loder N. Geographic gradients in body size: a clarification of Bergmann's rule // Diversity and distributions. 1999. Vol. 5, iss. 4. P. 165–174. doi: 10.1046/j.1472–4642.1999.00046.x.
14. Blanckenhorn W.U., Demont M. Bergmann and Converse Bergmann Latitudinal Clines: Two Ends of a Continuum? // Integrative and comparative biology. 2004. Vol. 44, iss. 6. P. 413–424. doi: 10.1093/icb/44.6.413.
15. Blanckenhorn W.U., Stillwell, R.C., Young K.A., Fox C.W., Ashton K.G. When Rensch meets Bergmann: does sexual size dimorphism change systematically with latitude? // Evolution. 2006. Vol. 60, iss. 10. P. 2004–2011 doi: 10.1111/j.0014–3820.2006.tb01838.x.
16. Chown S.L., Gaston K.J. Body size variation in insects: a macroecological perspective // Biological Reviews. 2009. Vol. 85, iss. 1. P. 139–169. doi: 10.1111/j.1469–185X.2009.00097.x.
17. Den Boer P.J. Carabids as objects of study // Carabid beetles, their adaptations and dynamics. Stuttgart: Gustav Fischer. 1986. P. 539–551.
18. Dial K.P., Greene E., Irschick D.J. Allometry of behavior // Trends in ecology & evolution. 2008. Vol. 23, iss. 7. 394–401.
19. Geraghty M.J., Dunn R.R., Sanders N.J. Body size, colony size, and range size in ants (Hymenoptera: Formicidae): are patterns along elevational and latitudinal gradients consistent with Bergmann's rule // Myrmecological news. 2007. Vol. 10. P. 51–58.
20. Harris R., McQuillan P., Hughes L. Patterns in body size and melanism along a latitudinal cline in the wingless grasshopper, *Phaulacridium vittatum* // Journal of biogeography. 2012. Vol. 39, iss. 8. P. 1450–1461. doi: 10.1111/j.1365–2699.2012.02710.x.
21. Hurka K. Carabidae of the Czech and Slovak Republics. Zlin: Kabourek, 1996. 565 p.
22. Inward D.J.G., Davies R.G., Pergande C., Denham A.J., Volger A.P. Local and regional ecological morphology of dung beetle assemblages across four biogeographic regions // Journal of biogeography. 2011. Vol. 38, iss. 9. P. 1668–1682. doi: 10.1111/j.1365–2699.2011.02509.x.
23. Kaspari M., Marshall K.E., Weiser M.D., Siler C.D., Theriot M.K., de Beurs K. Geographic gradients in a functional trait: Drivers of body size and size diversity of ground invertebrate communities // Ecosphere. 2024. Vol. 15, iss. 3. doi: 10.1002/ecs2.4785.
24. Koivula M.J. Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reflecting environmental conditions // ZooKeys. 2011. Iss. 100. P. 287. doi: 10.3897/zookeys.100.1533.
25. Kotze D.J., Brandmayr P., Casale A., Dauffy–Richard E., Dekoninck W., Koivula M.J., Lövei G.L., Mossakowski D., Noordijk J., Paarmann W., Pizzolotto R., Saska P., Schwerk A., Serrano J., Szyszko J., Taboada A., Turin H., Venn S., Vermeulen R., Zetto T. Forty years of carabid beetle research in Europe – from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation // Zookeys. 2011. Iss. 100. P. 55–148. doi: 10.3897/zookeys.100.1523.
26. Kromp B. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement // Agriculture, ecosystems and environment. 1999. Vol. 74, iss. 1–3. P. 187–228.
27. Luzyanin S., Saveliev A., Ukhova N., Vorobyova I., Solodovnikov I., Anciferov A., Shagidullin R., Teofilova T., Nogovitsyna S., Brygadyrenko V., Alexanov V., Sukhodolskaya R. Modeling sexual differences of body size variation in ground beetles in geographical gradients: a case study of *Pterostichus melanarius* (Illiger, 1798) (Coleoptera, Carabidae) // Life. 2022. Vol. 12, iss. 1. P. 112. doi: 10.3390/life12010112.
28. Masaki S. Geographic variation and climatic adaptation in a field cricket (Orthoptera: Gryllidae) // Evolution. 1967. Vol. 21, №4. P. 725–741. doi: 10.2307/2406770.
29. Matalin A.V. Typology of the life cycles of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of the western Palearctic // Entomological review. 2007. Vol. 87. P. 947–972.
30. Mousseau T.A. Ectotherms follow the converse to Bergmann's rule // Evolution. 1997. Vol. 51, №2. P. 630–632. doi: 10.2307/2411138.
31. Mukhametnabiev T. Manual Carabid morphometric measurement for method by Sukhodolskaya // URL: <https://github.com/CRTmatrix/-Manual-Carabidmorphometric-measurement-for-method-by-Sukhodolskaya> (accessed 10.11.2024).
32. Ray C. The application of Bergmann's and Allen's rules to the poikilotherms // Journal of morphology. 1960. Vol. 106, iss. 1. P. 85–108. doi: 10.1002/jmor.1051060104.
33. Sunderland K.D. The diet of some predatory arthropods in cereal crops // Journal of applied ecology. 1975. Vol. 12, №2. P. 507–515. doi: 10.2307/2402171.
34. Shelomi M. Where are we now? Bergmann's rule sensu lato in insects // The American naturalist. 2012. Vol. 180, №4. P. 511–519. doi: 10.1086/667595.
35. Shelomi M., Meri S. A practical guide to collections-based research on ecogeographic rules // Ecology and evolution. 2023. Vol. 13, iss. 6. doi: 10.1002/ece3.10211.
36. Sota T., Takami Y., Kubota K., Ujiiie M., Ishikawa R. Interspecific body size differentiation in species assemblages of the carabid subgenus *Ohomopterus* in Japan // Population ecology. 2000. Vol. 42. P. 279–291. doi: 10.1007/PL00012006.
37. Stillwell R.C., Morse G.E., Fox C.W. Geographic variation in body size and sexual size dimorphism of a seed feeding // American naturalist. 2007. Vol. 170, №3. P. 358–369. doi: 10.1086/520118.
38. Stillwell R.C. Are latitudinal clines in body size adaptive? // Oikos. 2010. Vol. 119, iss. 9. P. 1387–1390. doi: 10.1111/j.1600–0706.2010.18670.x.
39. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A. Effects of ecological factors on size-related traits in the ground beetle *Carabus granulatus* L. (Coleoptera, Carabidae) // Russian journal of ecology. 2014. Vol. 45. P. 414–420. doi: 10.1134/S1067413614050142.

40. Sukhodolskaya R., Saveliev A. Body size variation in Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae) in latitude gradient // *Periodicum biologorum*. 2016. Vol. 118, iss. 3. P. 273–278. doi: 10.18054/pb.2016.118.3.3918.

41. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A. Geographical variation of sexual size dimorphism of the ground beetle *Carabus granulatus* L. (Coleoptera, Carabidae) // *Russian journal of applied ecology*. 2017. №4. P. 3–10.

42. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A., Gordienko T.A., Vavilov D.N. Sexual size dimorphism in Ground Beetles and its modeling in latitude gradient // *GSC biological and pharmaceutical sciences*. 2018. Vol. 3, iss. 1. P. 11–18. doi: 10.30574/gscbps.2018.3.1.0009.

43. Sukhodolskaya R.A., Vavilov D.N., Gordienko T.A., Mukhametnabiev T.R. Variability of assemblage structure and body sizes in the ground beetles (Coleoptera, Carabidae) along an anthropogenic impact gradient // *Biology bulletin*. 2020. Vol. 48, iss. 10. P. 1777–1784. doi: 10.35885/1684-7318-2020-1-99-114.

44. 2345432. 2021. Vol. 191.

45. Thiago M.A., Fernanda F.S., Marconi S.S. Analysis of morphometry and dimorphism in *Enhydrus sulcatus* (Wiedeman, 1821) (Coleoptera: Gyrinidae) // *Neotropical biology and conservation*. 2011. Vol. 6, iss. 3. P. 178–186. doi: 10.4013/nbc.2011.63.05.

46. Turin H., *The genus Carabus in Europe: a synthesis*. Sofia–Moscow: Pensoft, 2003. 511 p.

Горбунов Р.П., Алексанов В.В., Теофилова Т.М., Ланграф В., Солодовников И.А., Суходольская Р.А. **Изменчивость размеров тела жужелиц вдоль географических градиентов (на примере *Carabus granulatus* L.)**.

Цель работы – прояснить правило Бергмана в отношении экотермов, взяв в качестве модели жужелицу *Carabus granulatus*. Жужелицы – хорошо представленная, обильная по численности группа. Они чувствительны к действию экологических факторов и подходят для экологических исследований. Жуки отбирались с помощью ловушек Барбера в 8 регионах в России и за границей, территория исследований находилась между 42.8 и 56.8 градусами с юга на север и между 17.6 и 86.1 с запада на восток. В общей сложности было измерено 6172 экземпляра по 6 линейным признакам. Линейные и полиномиальные тренды показали, что длина и ширина надкрылий, а также ширина пронотума уменьшались в градиенте широты при использовании линейной регрессии, или показывали холмообразную изменчивость в ширине надкрылий — при использовании полиномиальной регрессии. Не было обнаружено тренда в изменении значений признаков в градиенте долготы при использовании линейной регрессии, но кривые полиномиальной регрессии были явно U-образными для длины головы и расстояния между глазами в градиенте широты и холмообразной — в градиенте долготы. Изменение степени вариации признаков (CV) не было достоверным ни для одного из признаков. Наши исследования не подтверждают наличия прямой корреляции между изменчивостью размеров отдельных признаков и изменчивостью их коэффициента вариации в широтном градиенте, которая была показана для некоторых животных.

*Ключевые слова:* вариация размеров тела; жужелицы; географический градиент; морфометрия; правило Бергмана.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 28.05.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 10.06.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 17.06.2025

#### Информация об авторах

Горбунов Роман Павлович, младший научный сотрудник, аспирант, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28; младший научный сотрудник, Государственный природный заповедник «Белогорье», 309342, Россия, Белгородская обл., пос. Борисовка, пер. Монастырский, 3, E-mail: xobglor@gmail.com.

Алексанов Виктор Валентинович, кандидат биологических наук, главный специалист, Государственное бюджетное учреждение Калужской области «Дирекция парков», 248035, Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 73, E-mail: victor\_alex@list.ru.

Теофилова Теодора Мариус, кандидат экологических наук, доцент, Институт биоразнообразия и экосистемных исследований, Болгарская академия наук, 1000, Болгария, г. София, бул. Царя-Освободителя, 1, E-mail: oberon\_zoo@abv.bg.

Ланграф Владимир, кандидат биологических наук, доцент, Университет Философа Константина в Нитре, 94901, Словакия, г. Нитра, ул. Андрея Хлинку, 1, E-mail: langrafvladimir@gmail.com.

Солодовников Игорь Альбертович, кандидат биологических наук, доцент, Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, 210038, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр., 33, E-mail: iasolodov@mail.ru.

Суходольская Раиса Анатольевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28; преподаватель, Казанский государственный медицинский университет, 420012, Россия, г. Казань, ул. Бутлерова, 49; научный сотрудник, Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник, 422623, Россия, Зеленодольский район, пос. Садовый, ул. Вехова, 1, E-mail: sukhodolskayaraisa@gmail.com.

#### Information about the authors

Roman P. Gorbunov, Junior Researcher, Postgraduate Student, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia; Junior Researcher, Belogorye State Nature Reserve, Monastir'skiy byst., Borisovka settl., Belgorod Region, 309342, Russia, E-mail: xobglor@gmail.com.

Victor V. Aleksanov, Ph.D. in Biology, Main Specialist, Parks Directorate of the Kaluga Region, 73, Grabtsevskoye road, Kaluga, 248035, Russia, E-mail: victor\_alex@list.ru.

Teodora M. Teofilova, Ph.D. in Ecology and Ecosystems Protection, Associate Professor, Institute of Biodiversity and Ecosystem Research, Bulgarian Academy of Sciences, 1, Tsar Osvoboditel Blvd., Sofia, 10000, Bulgaria, E-mail: oberon\_zoo@abv.bg.

Vladimir Langraf, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Constantine the Philosopher University in Nitra, 1, Tr. A. Hlinku, Nitra, 94901, Slovakia, E-mail: langrafvladimir@gmail.com.

Igor A. Solodovnikov, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Vitebsk State P.M. Masherov University, 33, Moskovsky Prospect, Vitebsk, 210038, Republic of Belarus, E-mail: iasolodov@mail.ru.

Raisa A. Sukhodolskaya, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia; Teacher, Kazan State Medical University, 49, Butlerov st., Kazan, 420012, Russia; Researcher, Volga-Kama State Natural Biosphere Reserve, 1, Vekhov st., Sadovy settl., Zelenodolsky district, 422623, Russia, E-mail: sukhodolskayaraisa@gmail.com.



Б.Т. Вагапов, К.К. Ибрагимова, Н.С. Архипова, А.В. Аринина, И.И. Рахимов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, [vagapov.bulat.t@yandex.ru](mailto:vagapov.bulat.t@yandex.ru)

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЫЛЬЦЫ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ НА РАЗНОЙ ВЫСОТЕ

Сезонные аллергические заболевания, вызванные пыльцевыми зёрнами ветроопыляемых древесных и травянистых форм растений, являются частой причиной возникновения симптомов аллергии у пациентов. Исследования, нацеленные на изучение пыльцевого состава атмосферы в городах, позволяют спрогнозировать возникновения поллинозов у населения, чувствительного к пыльце. Текущие мониторинговые исследования проводятся с использованием пыльцевых ловушек, размещаемых на крыше зданий, однако эффективность наблюдений в непосредственной близости к пациентам изучена в меньшей степени. В данной работе представлены результаты мониторинга пыльцы на высоте 1.5 и 20 м в трех локациях г. Казани. Пики пыления *Betula*, *Alnus*, *Corylus*, *Poaceae* имели небольшие временные смещения, сила корреляции уменьшалась при мониторинге вблизи парковой зоны, а также вдоль широких улиц.

*Ключевые слова:* пыльцевой мониторинг; аэропалинология; поллинозы; аллергический ринит; городская флора.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.22.29>

### Введение

Пыльца многих растений является одной из наиболее частых причин возникновения сезонных аллергических заболеваний. По разным оценкам, во всем мире чувствительность к пыльце растений наблюдается у 30% населения Европы и России (Brožek et al., 2017). Аллергия на пыльцу проявляется в виде широкого спектра симптомов, включая зуд, заложенность носа, бронхиальную астму и др. (Agenäs et al., 2023). Для оценки и прогнозирования возникновения сезонных поллинозов у пациентов ежегодно проводятся мониторинговые миссии, нацеленные на изучение паттернов изменчивости пыльцевого спектра в воздухе (Buters et al., 2018). Известны примеры развертывания масштабных мониторинговых сетей по всему миру (Albertini et al., 2013; Clot et al., 2024).

В основе методов исследования аэропалинологического спектра в атмосферном воздухе на предмет количественного и качественного пыльцевого состава лежит использование специализированного оборудования – пыльцевых ловушек (Heffer et al., 2005; Šaulienė et al., 2019; Sauvageat et al., 2020). Наиболее часто применяются устройства Hirst типа, крупнейшим производителем которых является Burkard Manufacturing Co Ltd (Hirst, 1952). Данные пыльцевые ловушки рассчитаны на семидневный цикл работы, устанавливаются стационарно в месте наблюдения на высоте от 10 до 20 м (Galán et al., 2014). Стандарты разме-

щения пыльцевых ловушек продиктованы более стабильным и постоянным пыльцевым составом на данной высоте, однако некоторые исследования демонстрируют факт того, что концентрация пыльцы на уровне ниже 10 м во многом коррелирует с пыльцевым спектром на уровне крыш зданий. Вдобавок непосредственный контакт аллергиков с пыльцой происходит на уровне роста человека, потому изучение распределения частиц пыльцы на данной высоте позволит дополнить данные мониторинга (Rantio-Lehtimäki et al., 1991; Raynor, Ogden, Hayes, 1973; Soldevilla et al., 1995). Одной из причин, по которой наблюдения на высоте роста человека вызывают проблемы, заключается в том, что классические пыльцевые пробоотборники не обладают достаточной мобильностью для их транспортировки и установки (Bernstein et al., 2022). Проблему мобильности позволяют решить персональные пробоотборники, активно разрабатываемые в последние десятилетия. Тем не менее, доступные на рынке портативные устройства не всегда имеют достаточную эффективность в отборе проб биоаэрозолей в сравнении со стационарными устройствами (Nelson, Solomon, 2003; Peel et al., 2014). Отдельные разработки, например аппарат Pollensniffer, демонстрируют достаточно высокую корреляцию количества частиц, отобранных портативной и семидневной пыльцевыми ловушками (Wegerde et al., 2020).

Также одной из наиболее важных проблем мо-

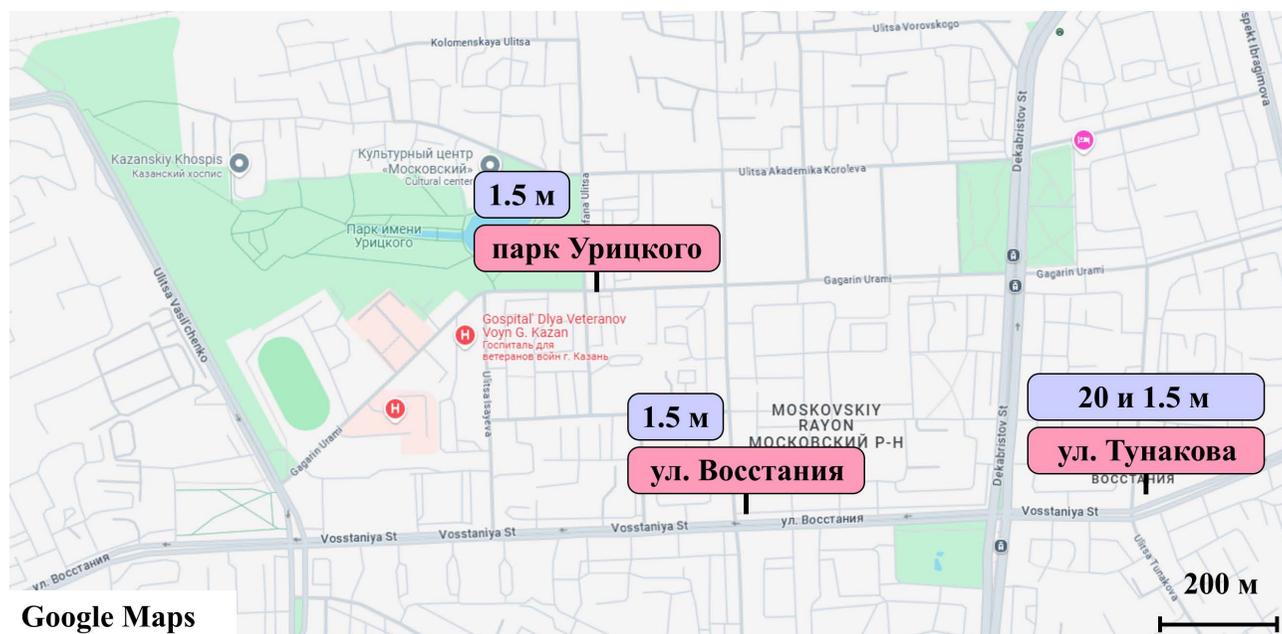


Рис. 1. Места расположения пробоотборников  
Fig. 1. Locations of samplers

нитинга пыльцевых аллергенов в атмосферном воздухе является проблема экстраполяции результатов, полученных с одной локальной станции, на близлежащие территории. Пыльцевой спектр в областях, отдаленных от точек мониторинга, может обладать некоторой изменчивостью. Поскольку на данный момент глобальный мониторинг аэроаллергенов невозможен, существующие модели исследования должны учитывать ошибки, вызванные пространственным разрешением (Oteros et al., 2019).

В связи с этим, целью данной работы является оценка влияния локации размещения пробоотборников на уровне роста человека на релевантность получаемых данных о концентрации пыльцевых зерен в атмосфере. Нами были поставлены следующие задачи: 1) проанализировать степень корреляции в отборе проб портативной и стационарной пыльцевой ловушкой; 2) оценить влияние размещения пробоотборников на высоте роста человека на репрезентативность данных относительно стандартного размещения на высоте 20 м; 3) оценить влияние выбора локации размещения оборудования на получаемый спектр пыльцы.

### Материалы и методы исследования

Мониторинг пыльцы проводился в Московском районе города Казани с 1 марта по 30 июля 2024 г. в период активного пыления растений. На крыше жилого дома по ул. Туакова на уровне 20 м отбор проб производился стационарным пробоотборником Lanzoni VPPS 2010 на отдалении 1000 м от ближайшей парковой зоны. Портативные пробоотборники Pollenlab Sampler собствен-

ной разработки (патент RU2 840160 C1) были установлены на уровне 1.5 м от поверхности земли в трех локациях: на ул. Туакова, ул. Восстания, а также в непосредственной близости к парку Урицкого на ул. Гагарина (рис. 1).

Прототип пробоотборника Pollenlab Sampler был сконструирован методом 3D-печати из ABS-пластика. Устройство состоит из следующих компонентов: воронки с входным отверстием, камеры захвата частиц пыльцы, блока с вентилятором и аккумулятором. В камере захвата частиц фиксируется образец, представляющий собой предметное стекло, покрытое пленкой с липким составом (рис. 2).

Разработанное устройство было валидировано относительно стационарной пыльцевой ловушки Lanzoni. Для этого оба пробоотборника устанавливались на одной высоте на крыше здания таким образом, чтобы их входные отверстия были ориентированы в одну сторону. Измерения уровня пыльцы портативной пыльцевой ловушкой и стационарным пробоотборником производились сессиями по 60 минут.

При мониторинге уровня пыльцы анализировалось содержание четырех таксонов: береза (род *Betula*), ольха (род *Alnus*), лещина (рода *Corylus*) и злаки (семейство *Poaceae*), которые являются типичными аэроаллергенами района исследования (Vagarov, Ibragimova, Arhipova, 2023). Тем не менее, из тех таксонов, что изучались нами при аэропалеонтологическом мониторинге, широко представлены во флоре были только представители рода *Betula*. По данным маршрутных обследований парков и зеленых насаждений, проведен-

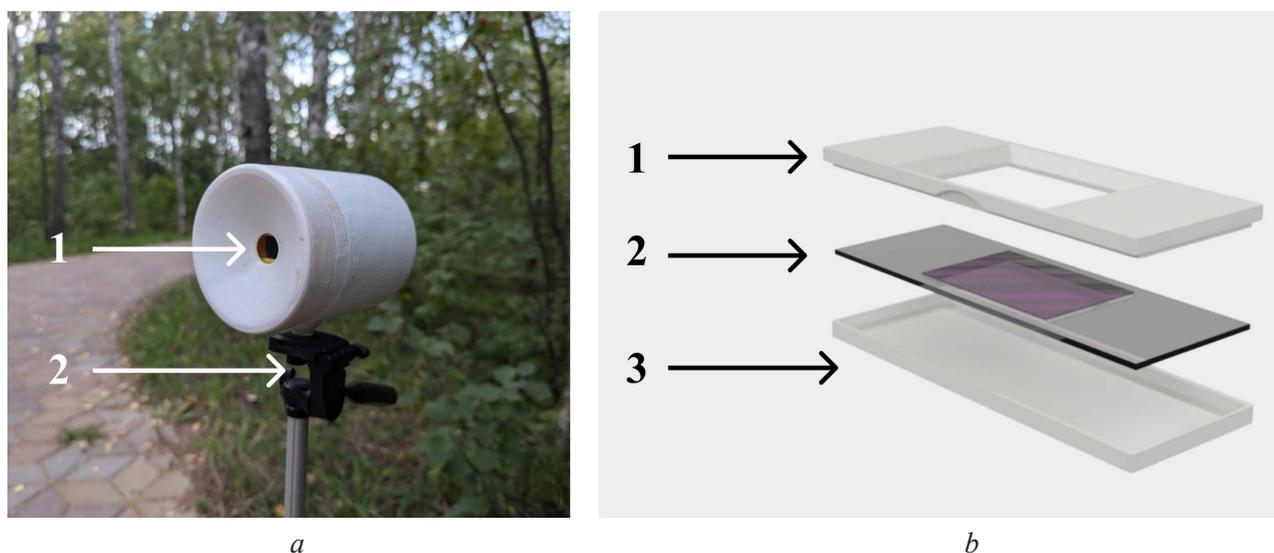


Рис. 2. Элементы строения пылевой ловушки Pollenlab Sampler.

а) Устройство на штативе. 1 – входное отверстие воронки, 2 – штатив;

б) Картридж с образцом: 1 – верхняя крышка с вырезом для заливки липкого раствора, 2 – предметное стекло, 3 – нижняя часть

Fig. 2. Pollenlab Sampler pollen trap prototype design elements: a) The device on a stand: 1 – inlet, 2 – stand; b) Design of the cartridge with the sample: 1 – upper cover with a cutout for pouring in the sticky solution, 2 – slide, 3 – lower part

ных в 2022 г. в Казани, среди доминирующих древесных растений были представители рода *Tilia* (23%), *Acer* (22%), *Betula* (11%). На долю растений рода *Corylus* и *Alnus* приходилось менее 4%.

После взятия проб пыльцы изготавливались препараты для микроскопии. Использовали стандартные методы приготовления образцов с применением полиэстеровой ленты и липких пленок (Thibaudon et al., 2017). Частицы, проходящие через входное отверстие пылевых ловушек, агрегировались на специальную липкую основу на базе глицерина и желатина (Zander, 1997). Образцы, полученные с обоих устройств, окрашивались фуксином и анализировались с помощью светового микроскопа Altami LUM2 на увеличении  $\times 400$ , подсчитывалось общее количество пылевых зерен, а также определялась их таксономическая принадлежность (Jones et al., 2024). Количество пыльцы, полученное с пробоотборников, подсчитывалось относительно кубического метра воздуха по формуле (Oteros et al., 2017):

$$C = \frac{tl}{tlc} \times \frac{1}{av} \times pc$$

где  $C$  – концентрация пыльцы (ед./м<sup>3</sup>),  $tl$  – длина трансекты (мм), т.е. длина полоски липкого слоя, на которую налипли частицы,  $tlc$  – длина исследованной трансекты (мм), т.е. длина исследованной части образца,  $av$  – объем воздуха за 60 мин.,  $pc$  – количество пыльцы. Фактический объем собранного воздуха ( $av$ ) вычислялся по формуле:

$$av = \frac{sr}{1000} \times nm$$

где  $sr$  – сила всасывания (л/мин.),  $nm$  – время, в течение которого производился отбор пробы (мин.).

Количество полных проходов, исследованных по ширине следа осаждения, вычислялось по формуле:

$$tlc = mfd \times nt$$

где  $mfd$  – диаметр поля зрения микроскопа,  $nt$  – количество трансект.

Сравнительный анализ пылевого состава в образцах, полученных двумя пробоотборниками в различных локациях, осуществлялся с применением метода ранговой корреляции Спирмена, поскольку тест Шапиро-Уилка не демонстрировал нормальности распределения в выборках. Степень различий количества собранных частиц определялась с использованием U-критерия Манна-Уитни. Достоверность различия и корреляции принималась при  $p < 0.05$ . Анализ проводился при помощи программного пакета STATISTICA 12.

### Результаты

Концентрация пыльцы, собранной портативным пробоотборником Pollenlab Sampler, коррелировала с концентрацией пыльцы, полученной в результате использования стационарной пылевой ловушки. Наиболее схожий характер захвата

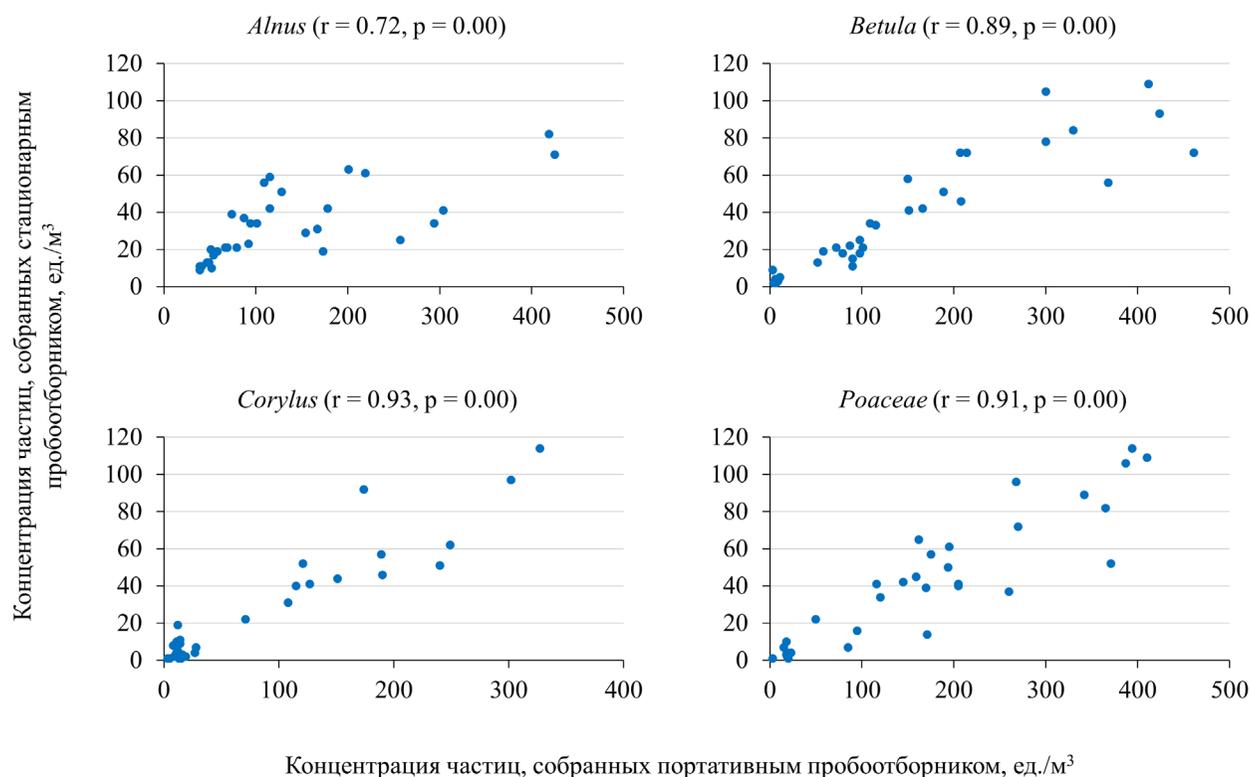


Рис. 3. Степень корреляции между концентрациями частиц, полученных двумя пробоотборниками  
 Fig. 3. Correlation level between the concentration of particles obtained by two samplers

частиц наблюдался у пыльцы *Corylus*. При этом портативная пылевая ловушка захватывала в среднем в 3.84 раза больше пыльцы, что в перспективе позволит сократить время отбора проб (рис. 3).

Сравнительный анализ распределения частиц по времени в локациях вдали и рядом с зелеными насаждениями на разной высоте демонстрировал схожие паттерны пылевого спектра. В целом количество частиц, собранное в трех локациях на высоте 1.5 м, было схоже с таковым на высоте 20 м. Однако в отдельных случаях место сбора оказывало влияние на динамику концентрации пыльцы. Пыльца обнаруживалась в тот же день при сборе материала обоими устройствами. При расположении Pollenlab Sampler на высоте роста человека в этой же локации (ул. Тунакова) коэффициент Спирмена также демонстрировал высокую корреляцию. Пиковые значения пыльцы не имели тенденции к сильному смещению по времени. Повышение содержания пыльцы можно было наблюдать в тот же день, что и в образцах, полученных ловушкой Lanzoni на высоте 20 м (рис. 4).

При расположении Pollenlab Sampler на расстоянии 650 м от стационарной ловушки (ул. Восстания) наблюдались некоторые расхождения пиковых значений содержания пыльцы. Хотя коэффициент корреляции в среднем был высоким,

концентрация пыльцы злаков, собранных портативной пылевой ловушкой на высоте 1.5 м, была немного ниже, чем на высоте 20 м при сборе ловушкой Lanzoni. Наименьшая корреляция наблюдалась при сравнении уровня пыльцы *Alnus* ( $r=0.58$ ).

Пыльца, собранная Pollenlab Sampler рядом с парковой зоной (ул. Гагарина), ожидаемо присутствовала в образцах в значительно большем количестве из-за близости к источнику частиц. Повышение содержания пыльцы наблюдалось значительно раньше: за 5 дней до обнаружения на уровне 20 м вдали от парка. Степень корреляции при сравнении концентраций пыльцы, собранной рядом с парком и вдали от него на уровне 20 м, была высокой для *Betula*, *Corylus* и *Poaceae*, для пыльцы *Alnus* умеренной.

### Обсуждение

Количество пыльцы, собранной на разной высоте в трех локациях, во многом коррелировало. Когда портативный и стационарный пробоотборники устанавливались в одной локации, но на разной высоте, количество частиц пыльцы в образцах демонстрировали высокую корреляцию ( $r=0.81-0.91$ ). Наибольшая схожесть наблюдалась у пыльцы березы. Пиковые значение, уменьшение и повышение концентрации частиц в образ-

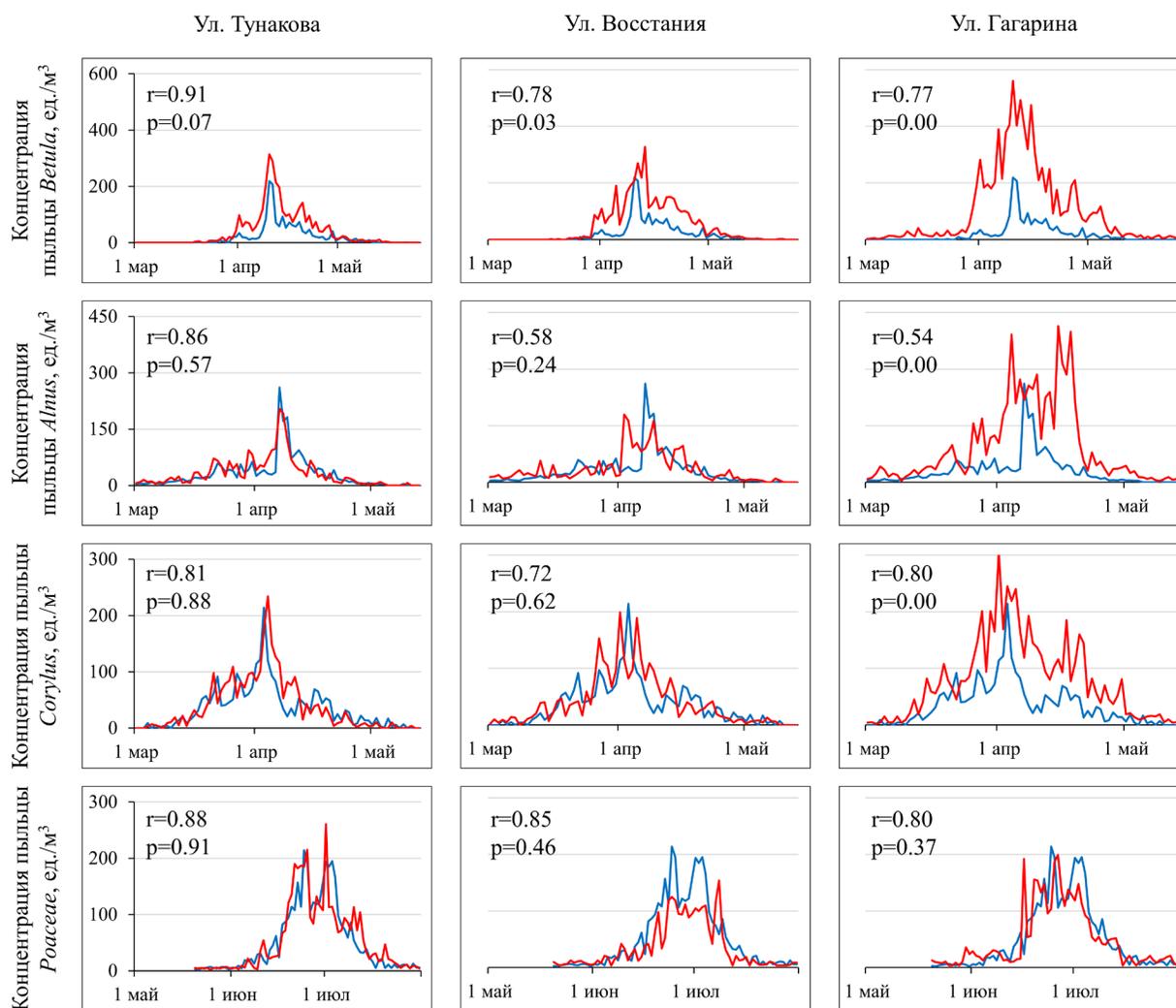


Рис. 4. Концентрация пыльцы различных таксонов, собранных на разной высоте в трех локациях: ул. Тунакова, ул. Восстания, парк Урицкого. Синим цветом отмечен уровень пыльцы, собранной стационарным пробоотборником Lanzoni в точке ул. Тунакова, на высоте 20 м. Красной линией отмечен уровень пыльцы, собранный Pollenlab Sampler на высоте 1.5 м в трех локациях

Fig. 4. The pollen concentration of different taxa collected at different height in three locations: Tunakova St., Vosstaniya St., Uritsky Park. The level of pollen collected by the Lanzoni static sampler at the Tunakova St. point at a height of 20 m is marked in blue. The level of pollen collected by the Pollenlab Sampler at a height of 1.5 m in three locations is marked in red

цах имели одинаковую тенденцию. Исключением было повышение содержания пыльцы в образцах, полученных с Pollenlab Sampler, у березы (11 апреля) и злаков (1 июля). Однако данное повышение, хотя и менее выражено, наблюдалось и в образцах, полученных стационарным пробоотборником.

На ул. Восстания количество пыльцы ольхи и злаков было более вариабельным, в некоторые дни пыльца обнаруживалась в меньшей концентрации, чем на высоте 20 м аппаратом Lanzoni. Также 3 апреля на высоте 1.5 м был замечен пик уровня пыльцы ольхи, при этом на высоте 20 м в этот день уровень пыльцы был в 4 раза ниже. Сильные скачки уровня пыльцы можно объяс-

нить влиянием внешних факторов: скоростью и направлением ветра относительно пылевой ловушки (Palacios, Molina, Rodríguez, 2000). Поскольку портативный пробоотборник был расположен вдоль широкой и протяженной улицы, ветровые потоки на высоте 1.5 м могли вносить определенные погрешности. Второй причиной подобного распределения частиц может быть различие в конструкции пылевых пробоотборников, например размеров и формы их входных отверстий (Miki et al., 2017).

При установке пробоотборника близко к локации с хорошим озеленением (ул. Гагарина) в образцах наблюдалось повышение концентрации пыльцы в 4–5 раз. Наиболее четко это прослежи-

валось при анализе спектра пыльцы древесных растений: березы, ольхи и лещины. В данном случае значительный прирост частиц в образцах напрямую связан с местом размещения пробоотборника, потому как степень озеленения в зоне отбора проб является главным фактором, влияющим на количество пыльцы (Ciani et al., 2021). Данное утверждение действительно актуально в отношении березы, на долю которой в городской флоре приходится до 11%. Однако поскольку представленность лещины и ольхи на исследуемой территории была низкой (4 и 2%, соответственно), существует ряд иных факторов, оказывающих влияние на пыльцевой состав. Подобные наблюдения также встречались в исследовании восприятия аллергии на пыльцу в г. Лейпциг, где также демонстрируется высокая пыльцевая нагрузка ольхи в парках, где данное растение не распространено (Kabisch et al., 2024). Из этого следует, что на уровень пыльцы оказывает влияние не только присутствие растений во флоре данной местности, но и такие факторы, как интенсивность продукции пыльцы растениями, а также распределение частиц ветром из других районов (Gehrig et al., 2015).

В отличие от пыльцы деревьев, уровень пыльцы злаков был более стабильным, и концентрация частиц, обнаруженных на высоте 20 м хорошо коррелировала с другими локациями на высоте 1.5 м ( $r > 0.80$ ).

### Заключение

При размещении пробоотборников на высоте роста человека и на уровне 20 м их пыльцевой спектр в значительной степени коррелировал, при этом вдоль широких улиц количество пыльцы отличалось большей изменчивостью. Размещение оборудования для мониторинга концентрации аллергенов вблизи парковых зон существенно влияет на данные количественного содержания пыльцевых зерен в образцах. Использование портативных пробоотборников для анализа концентрации частиц пыльцы на высоте человеческого роста дает возможность существенно расширить спектр получаемой информации для более точного прогнозирования пиков пыления.

### Список литературы

1. Agenäs H., Brorsson A. L., Kull I., Lindholm-Olinder A. Treatment with pollen allergen immunotherapy improves health-related quality of life in children and adolescents: a three-year follow-up-study // *Allergy, asthma & clinical immunology*. 2023. V. 19, iss. 1. P. 4. doi: 10.1186/s13223-023-00756-9.
2. Albertini R., Ugolotti M., Buters J., Reese G., Thibaudon M. The European project HIALINE (health impacts of airborne allergen information network): Results of pollen and allergen of

*Betula* monitoring in Parma (2009) // *Review of allergy and clinical immunology*. 2013. V. 23, iss. 1. P. 14–20.

3. Bernstein J., Matz J., Steven G., Greisner W., Cypcar D., Fost A. Clinical Trial experience with a new pollen sampling network in the US // *Journal of allergy and clinical immunology*. 2022. V. 149, iss. 2. eAB199. doi: 10.1016/j.jaci.2021.12.654.
4. Brožek J.L., Bousquet J., Agache I., Agarwal A., Bachert C., ... Holger J. Schünemann Allergic Rhinitis and its impact on asthma (ARIA) guidelines – 2016 revision // *Journal of allergy and clinical immunology*. 2017. V. 140, is. 4. P. 950–958. doi: 10.1016/j.jaci.2017.03.050.
5. Buters J.T., Antunes C., Galveias A., Bergmann K.C., Thibaudon M., Galán C. Pollen and spore monitoring in the world // *Clinical and translational allergy*. 2018. V. 8. P. 1–5. doi: 10.1186/s13601-018-0197-8.
6. Ciani F., Dell’Olmo L., Foggi B., Lippi M. The effect of urban green areas on pollen concentrations at ground level: A study in the city of Florence (Italy) // *Urban forestry & urban greening*. 2021. V. 60. e127045. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127045.
7. Clot B., Gilge S., Hajkova L., Magyar D., Scheifinger H., Sofiev M. The EUMETNET AutoPollenprogramme: establishing a prototype automatic pollen monitoring network in Europe // *Aerobiologia*. 2024. V. 40, is. 1. P. 3–11. doi: 10.1007/s10453-020-09666-4.
8. Galán C., Smith M., Thibaudon M., Frenguelli G., Oteros J., Gehrig R. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis // *Aerobiologia*. 2014. V. 30. P. 385–395. doi: 10.1007/s10453-014-9335-5.
9. Gehrig R., Gassner M., Schmid-Grendelmeier P. *Alnus* × *s-paethii* pollen can cause allergies already at Christmas // *Aerobiologia*. 2015. V. 31. P. 239–247. doi: 10.1007/s10453-014-9360-4.
10. Heffer M.J., Ratz J.D., Miller J.D., Day J.H. Comparison of the Rotorod to other air samplers for the determination of *Ambrosia artemisiifolia* pollen concentrations conducted in the environmental exposure unit // *Aerobiologia*. 2005. V. 21. P. 233–239. doi: 10.1007/s10453-005-9007-6.
11. Hirst J. An automatic volumetric spore trap // *Annals of applied biology*. 1952. V. 39, iss. 2. P. 257–265. doi: 10.1111/j.1744-7348.1952.tb00904.x.
12. Jones L.M., Mampage C.B., Peters T.M., Stone E.A. A scalable, passive sampling method for the quantification of airborne allergens // *MethodsX*. 2024. V. 12. e102787. doi: 10.1016/j.mex.2024.102787.
13. Kabisch N., Hornick T., Bumberger J., Krämer R., Legg R., Masztalerz O. Monitoring and perception of allergenic pollen in urban park environments // *Landscape and urban planning*. 2024. V. 250. e105133. doi: 10.1016/j.landurbplan.2024.105133.
14. Miki K., Kawashima S., Fujita T., Nakamura K., Clot B. Effect of micro-scale wind on the measurement of airborne pollen concentrations using volumetric methods on a building rooftop // *Atmospheric Environment*. 2017. V. 158. P. 1–10. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.015.
15. Nelson H. S., Solomon W. R. How ill the wind? Issues in aeroallergen sampling // *Journal of allergy and clinical immunology*. 2003. V. 112, iss. 1. P. 3–8. doi: 10.1067/mai.2003.1599.
16. Oteros J., Buters J., Laven G., Röseler S., Wachter R., Schmidt-Weber C., Hofmann F. Errors in determining the flow rate of Hirst-type pollen traps // *Aerobiologia*. 2017. V. 33. P. 201–210. doi: 10.1007/s10453-016-9467-x.
17. Oteros J., Bergmann K. C., Menzel A., Damialis A., Traidl-Hoffmann C., Schmidt-Weber C. B., Buters J. Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists // *Atmospheric environment*. 2019. V. 199. P. 435–442. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.11.045.
18. Peel R. G., Kennedy R., Smith M., Hertel O. Relative efficiencies of the Burkard 7-Day, Rotorod and Burkard Personal samplers for Poaceae and Urticaceae pollen under field con-

ditions // *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2014. V. 21, iss. 4. doi: 10.5604/12321966.1129927.

19. Rantio-Lehtimäki A., Koivikko A., Kupias R., Mäkinen Y., Pohjola A. Significance of sampling height of airborne particles for aerobiological information // *Allergy*. 1991. V. 46, iss. 1. P. 68–76. doi: 10.1111/j.1398-9995.1991.tb00545.x.

20. Raynor G.S., Ogden E.C., Hayes J.V. Variation in ragweed pollen concentration to a height of 108 meters // *Journal of allergy and clinical immunology*. 1973. V. 51, iss. 4. P. 199–207. doi: 10.1016/0091-6749(73)90139-5.

21. Šaulienė I., Šukienė L., Daunys G., Valiulis G., Vaitkevičius L., Matavulj P. Automatic pollen recognition with the Rapid-E particle counter: the first-level procedure, experience and next steps // *Atmospheric measurement techniques*. 2019. V. 12. Is. 6. P. 3435–3452. doi: 10.5194/amt-12-3435-2019.

22. Sauvageat E., Zeder Y., Auderset K., Calpini B., Clot B., Crouzy B. Real-time pollen monitoring using digital holography // *Atmospheric measurement techniques*. 2020. V. 13, iss. 3. P. 1539–1550. <http://doi.org/10.5194/amt-13-1539-2020>.

23. Palacios S.I., Molina T.R., Rodríguez M.A. Influence of wind direction on pollen concentration in the atmosphere // *International journal of biometeorology*. 2000. V. 44. P. 128–133. doi: 10.1007/s004840000059.

24. Soldevilla C. G., Alcázar-Teno P., Domínguez-Vilches E. Airborne pollen grain concentrations at two different heights // *Aerobiologia*. 1995. V. 11. P. 105–109. doi: 10.1007/BF02738275.

25. Thibaudon M., Galán C., Bonini M., Röseler S., Fernándezgonzález D. Ambient air-Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy-Volumetric Hirst method (CEN/TS 16868: 2015). 2017.

26. Vagapov B., Ibragimova K., Arhipova N. Assessment of palynological spectrum of air in Kazan.: EDP Sciences. 2023. V. 407. e04004. doi: 10.1051/e3sconf/202340704004.

27. Weger L. A., Molster F., Raat K., Haan J., Romein J., Leeuwen, W. A new portable sampler to monitor pollen at street level in the environment of patients // *Science of the total environment*. 2020. V. 741. P. 140404. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140404.

28. Zander R. H. On mounting delicate bryophytes in glycerol // *Bryologist*. 1997. P. 380–382. doi: 10.2307/3244509.

## References

1. Agenäs H., Brorsson A. L., Kull I., Lindholm-Olinder A. Treatment with pollen allergen immunotherapy improves health-related quality of life in children and adolescents: a three-year follow-up-study // *Allergy, asthma & clinical immunology*. 2023. Vol. 19, iss. 1. P. 4. doi: 10.1186/s13223-023-00756-9.

2. Albertini R., Ugolotti M., Buters J., Reese G., Thibaudon M. The European project HIALINE (health impacts of airborne allergen information network): Results of pollen and allergen of Betula monitoring in Parma (2009) // *Review of allergy and clinical immunology*. 2013. Vol. 23, iss. 1. P. 14–20.

3. Bernstein J., Matz J., Steven G., Greisner W., Cypcar D., Fost A. Clinical Trial experience with a new pollen sampling network in the US // *Journal of allergy and clinical immunology*. 2022. Vol. 149, iss. 2. eAB199. doi: 10.1016/j.jaci.2021.12.654.

4. Brożek J.L., Bousquet J., Agache I., Agarwal A., Bachert C., ... Holger J. Schünemann Allergic Rhinitis and its impact on asthma (ARIA) guidelines—2016 revision // *Journal of allergy and clinical immunology*. 2017. Vol. 140, iss. 4. P. 950–958. doi: 10.1016/j.jaci.2017.03.050.

5. Buters J.T., Antunes C., Galveias A., Bergmann K.C., Thibaudon M., Galán C. Pollen and spore monitoring in the world // *Clinical and translational allergy*. 2018. Vol. 8. P. 1–5. doi: 10.1186/s13601-018-0197-8.

6. Ciani F., Dell’Olmo L., Foggi B., Lippi M. The effect of urban green areas on pollen concentrations at ground level: A study in the city of Florence (Italy) // *Urban forestry & urban greening*. 2021. Vol. 60. e127045. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127045.

7. Clot B., Gilge S., Hajkova L., Magyar D., Scheifinger H., Sofiev M. The EUMETNET AutoPollenprogramme: establishing a prototype automatic pollen monitoring network in Europe // *Aerobiologia*. 2024. Vol. 40, iss. 1. P. 3–11. doi: 10.1007/s10453-020-09666-4.

8. Galán C., Smith M., Thibaudon M., Frenguelli G., Oteros J., Gehrig R. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis // *Aerobiologia*. 2014. Vol. 30. P. 385–395. doi: 10.1007/s10453-014-9335-5.

9. Gehrig R., Gassner M., Schmid-Grendelmeier P. *Alnus*×*spæthii* pollen can cause allergies already at Christmas // *Aerobiologia*. 2015. Vol. 31. P. 239–247. doi: 10.1007/s10453-014-9360-4.

10. Hoffer M.J., Ratz J.D., Miller J.D., Day J.H. Comparison of the Rotorod to other air samplers for the determination of *Ambrosia artemisiifolia* pollen concentrations conducted in the environmental exposure unit // *Aerobiologia*. 2005. Vol. 21. P. 233–239. doi: 10.1007/s10453-005-9007-6.

11. Hirst J. An automatic volumetric spore trap // *Annals of applied biology*. 1952. Vol. 39, iss. 2. P. 257–265. doi: 10.1111/j.1744-7348.1952.tb00904.x.

12. Jones L.M., Mampage C.B., Peters T.M., Stone E.A. A scalable, passive sampling method for the quantification of airborne allergens // *MethodsX*. 2024. Vol. 12. e102787. doi: 10.1016/j.mex.2024.102787.

13. Kabisch N., Hornick T., Bumberger J., Krämer R., Legg R., Masztalerz O. Monitoring and perception of allergenic pollen in urban park environments // *Landscape and urban planning*. 2024. Vol. 250. e105133. doi: 10.1016/j.landurbplan.2024.105133.

14. Miki K., Kawashima S., Fujita T., Nakamura K., Clot B. Effect of micro-scale wind on the measurement of airborne pollen concentrations using volumetric methods on a building rooftop // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 158. P. 1–10. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.015.

15. Nelson H. S., Solomon W. R. How ill the wind? Issues in aeroallergen sampling // *Journal of allergy and clinical immunology*. 2003. Vol. 112, iss. 1. P. 3–8. doi: 10.1067/mai.2003.1599.

16. Oteros J., Buters J., Laven G., Röseler S., Wachter R., Schmidt-Weber C., Hofmann F. Errors in determining the flow rate of Hirst-type pollen traps // *Aerobiologia*. 2017. Vol. 33. P. 201–210. doi: 10.1007/s10453-016-9467-x.

17. Oteros J., Bergmann K. C., Menzel A., Damialis A., Traidl-Hoffmann C., Schmidt-Weber C. B., Buters J. Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists // *Atmospheric environment*. 2019. Vol. 199. P. 435–442. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.11.045.

18. Peel R. G., Kennedy R., Smith M., Hertel O. Relative efficiencies of the Burkard 7-Day, Rotorod and Burkard Personal samplers for Poaceae and Urticaceae pollen under field conditions // *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2014. Vol. 21, iss. 4. doi: 10.5604/12321966.1129927.

19. Rantio-Lehtimäki A., Koivikko A., Kupias R., Mäkinen Y., Pohjola A. Significance of sampling height of airborne particles for aerobiological information // *Allergy*. 1991. Vol. 46, iss. 1. P. 68–76. doi: 10.1111/j.1398-9995.1991.tb00545.x.

20. Raynor G.S., Ogden E.C., Hayes J.V. Variation in ragweed pollen concentration to a height of 108 meters // *Journal of allergy and clinical immunology*. 1973. Vol. 51, iss. 4. P. 199–207. doi: 10.1016/0091-6749(73)90139-5.

21. Šaulienė I., Šukienė L., Daunys G., Valiulis G., Vaitkevičius L., Matavulj P. Automatic pollen recognition with the Rapid-E particle counter: the first-level procedure, experience

and next steps // Atmospheric measurement techniques. 2019. Vol. 12, iss. 6. P. 3435–3452. doi: 10.5194/amt-12-3435-2019.

22. Sauvageat E., Zeder Y., Auderset K., Calpini B., Clot B., Crouzy B. Real-time pollen monitoring using digital holography // Atmospheric measurement techniques. 2020. Vol. 13, iss. 3. P. 1539–1550. <http://doi.org/10.5194/amt-13-1539-2020>.

23. Palacios S.I., Molina T.R., Rodríguez M.A. Influence of wind direction on pollen concentration in the atmosphere // International journal of biometeorology. 2000. Vol. 44. P. 128–133. doi: 10.1007/s004840000059.

24. Soldevilla C. G., Alcázar-Teno P., Domínguez-Vilches E. Airborne pollen grain concentrations at two different heights // Aerobiologia. 1995. Vol. 11. P. 105–109. doi: 10.1007/BF02738275.

25. Thibaudon M., Galán C., Bonini M., Röseler S., Fernándezgonzález D. Ambient air-Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy-Volumetric Hirst method (CEN/TS 16868: 2015). 2017.

26. Vagapov B., Ibragimova K., Arhipova N. Assessment of palynological spectrum of air in Kazan.: EDP Sciences. 2023. Vol. 407. e04004. doi: 10.1051/e3sconf/202340704004.

27. Weger L. A., Molster F., Raat K., Haan J., Romein J., Leeuwen, W. A new portable sampler to monitor pollen at street level in the environment of patients // Science of the total environment. 2020. Vol. 741. P. 140404. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140404.

28. Zander R. H. On mounting delicate bryophytes in glycerol // Bryologist. 1997. P. 380–382. doi: 10.2307/3244509.

Vagapov B.T., Ibragimova K.K., Arinina A.V., Arhipova N.S., Rakhimov I.I. **Analysis of pollen distribution in the urban environment at different heights.**

Seasonal allergic diseases caused by pollen grains of wind-pollinated trees and herbaceous plants are a common cause of allergy symptoms in patients. Studies aimed to investigation the pollen composition of the atmosphere in cities allow us to predict the occurrence of pollinosis in the population sensitive to pollen. Current monitoring studies are conducted using pollen traps placed on the roof of the buildings, but the effectiveness of observations in close proximity to patients has been studied to a lesser extent. This paper presents the results of monitoring at 1.5 and 20 m in four locations in Kazan. The peaks of pollen of *Betula*, *Alnus*, *Corylus*, *Poaceae* had small temporal shifts, the strength of the correlation decreased when monitoring was held near the park area, as well as along wide streets.

**Keywords:** pollen monitoring; aeropallinology; pollinosis; allergic rhinitis; urban flora.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 13.03.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 27.03.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 10.04.2025

#### Информация об авторах

Вагапов Булат Тимурович, аспирант, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: [vagapov.bulat.t@yandex.ru](mailto:vagapov.bulat.t@yandex.ru).

Ибрагимова Кадрия Камилевна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: [kadriya.ibragimova@mail.ru](mailto:kadriya.ibragimova@mail.ru).

Аринина Алла Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: [arininaalla@mail.ru](mailto:arininaalla@mail.ru).

Архипова Наталья Степановна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: [na.st.ar@ya.ru](mailto:na.st.ar@ya.ru).

Рахимов Ильгизар Ильясович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: [rakhim56@mail.ru](mailto:rakhim56@mail.ru).

#### Information about the authors

Bulat T. Vagapov, Postgraduate Student, Assistant, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: [vagapov.bulat.t@yandex.ru](mailto:vagapov.bulat.t@yandex.ru).

Kadriya K. Ibragimova, PhD in Biology, associate professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: [kadriya.ibragimova@mail.ru](mailto:kadriya.ibragimova@mail.ru).

Alla V. Arinina, PhD in Biology, associate professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: [arininaalla@mail.ru](mailto:arininaalla@mail.ru).

Natalya S. Arhipova, PhD in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: [na.st.ar@ya.ru](mailto:na.st.ar@ya.ru).

Ilgizar I. Rahimov, D.Sci. in Biology, Professor, Head of Department, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: [rakhim56@mail.ru](mailto:rakhim56@mail.ru).



## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕР БОЛЬШОЕ ГОЛУБОЕ И МАЛОЕ ГОЛУБОЕ ПО МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ В СЕЗОННОЙ ДИНАМИКЕ

Представлены данные по сезонной динамике численности бактериопланктона и бактериобентоса в озерах Большое Голубое и Малое Голубое (Республика Татарстан). Общая численность бактериопланктона изменялась в пределах 0.65–1.27 млн. кл./мл, численность сапрофитов была низкой, соотношения общей численности бактериопланктона и сапрофитных бактерий были на уровне  $10^4$ , иногда снижались до  $10^3$ . По всем показателям качество воды оценивалось как «условно чистая». Общая численность бактериобентоса в донных отложениях озер изменялась незначительно, в пределах 57–128 млн. кл./г, численность сапрофитов и соотношение сапрофитов к общей численности бактерий были низкими, по всем показателям состояние донных отложений оценивалось в пределах нормы.

*Ключевые слова:* бактериопланктон; бактериобентос; сапрофитные бактерии; качество воды; Голубые озера.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.30.38>

### Введение

Среди комплекса гидробиологических исследований озер немаловажную роль играют наблюдения за микробными сообществами воды и донных отложений. Бактериопланктон и бактериобентос участвуют в циркулировании биогенных элементов, а также в превращении органических веществ, энергии в водных экосистемах, и являются одними из самых многочисленных групп в составе сообществ водных объектов. Численность и состав микробных сообществ в водных экосистемах – это один из главных показателей качества вод и донных отложений озер, они усваивают органические вещества и производят микробную биомассу, которая составляет большую часть биомассы водного и бентосного планктона. Также микроорганизмы являются важным пищевым ресурсом и способствуют созданию новой биомассы в водных экосистемах (Gilbert, 2022; Romanenko, 2023; Краснова, Уманская, 2021, 2024).

Различные внешние факторы прямо или косвенно могут оказывать влияние на физические, химические и биологические параметры водных экосистем, а значит, на активность и разнообразие микробных сообществ. Численность бактерий чрезвычайно зависит от изменений окружающей среды, от климатических условий, времени года, антропогенной нагрузки на водоемы и др.

Количество бактерий, населяющих водные объекты, часто повышается во время дождей, весенних половодий, цветения фитопланктона, осеннего опада листьев. В результате наблюдаются изменения в динамике роста, биомассы и видового состава микробных сообществ воды и донных отложений (Diaz-Torres et al., 2022; Акулова и др., 2022; Romanenko, 2023; Jiang et al., 2024). Помимо общей численности бактериопланктона и бактериобентоса, количественные показатели сапрофитных и олиготрофных бактерий также указывают на состояние водоемов и сезонные изменения в экосистемах водных объектов (Кирюхина и др., 2022).

Исследование колебаний численности бактериопланктона и бактериобентоса в сезонной динамике имеет большое значение в рамках мониторинга качества воды и донных отложений водоемов. Динамики роста водных и бентосных бактерий также дают основу для понимания процессов, которые происходят в экосистеме водного объекта: круговорот питательных веществ, развитие и условия обитания других групп гидробионтов и т.д. Годовая динамика развития микробных сообществ также важна при прогнозировании состояния экосистемы водоема (Chen et al., 2016; Stoeck et al., 2018; Zhang et al., 2024; Краснова, Уманская, 2024).

Озера Большое Голубое и Малое Голубое – со-



Рис. 1. Станции отбора проб воды и донных отложений на озерах Большое Голубое (а) и Малое Голубое (б)

Fig.1. Water and sediment sampling stations at Bolshoe Goluboe (a) and Maloe Goluboe (b) lakes

лоноватые карстовые водоемы, которые входят в систему озер государственного природного заказника «Голубые озера» (Республика Татарстан). Вода в озерах отличается высокой прозрачностью и красивым бирюзовым цветом (Уникальные ..., 2001). Голубые озера являются популярным объектом туризма и рекреации.

В настоящее время высокая рекреационная нагрузка представляет серьезную угрозу для экологического состояния Голубых озер, так как может вызвать загрязнение, зарастание и заболачивание их уникальных экосистем. Мониторинг воды и донных отложений, а также оценка современного экологического состояния озер Большое Голубое и Малое Голубое необходимы для сохранения их экологически благополучного состояния, разработки рекомендаций по регулированию рекреационной нагрузки и планирования природоохранных мероприятий.

Проведенные в июне 2021 г. микробиологические исследования установили, что вода в оз. Большое Голубое относится к I классу качества, состояние донных отложений также находилось в пределах нормы (Морозова и др., 2022).

Сезонная динамика численности микробных сообществ может помочь в оценке экологического состояния водных и бентосных экосистем Голубых озер в течение всего года, чтобы выявить наиболее проблемные периоды.

Цель данного исследования – оценить экологическое состояние озер Большое Голубое и Малое Голубое по показателям бактериопланктона и бактериобентоса в сезонной динамике.

#### Материалы и методы исследования

Озера Большое Голубое и Малое Голубое расположены на правом берегу р. Казанки на территории Республики Татарстан (N 55°54'24.52'', E 49°09'26.46''). Площадь Большого Голубого озера составляет 2.73 га, глубина достигает 16 м, площадь Малого Голубого озера – 0.32 га, максимальная глубина – 4 м. Озера образованы мощными родниками, для них характерна высокая скорость водообмена (3–23 раза в сутки, соответственно). В оз. Большое Голубое подземные напорные источники при выходе на поверхность сформировали две карстовые воронки (пучины), глубина Большой пучины 16 м, Малой – 4 м. Температура воды в озерах мало меняется в течение года и сохраняется в пределах 5–8 °С. Воды озер по гидрохимическому составу относятся к сульфатно-кальциевым и отличаются повышенной минерализацией 2.3–2.5 мг/дм<sup>3</sup>. Темно-серые и серые илы с характерным запахом сероводорода формируют донные отложения озер (Иванов и др., 2016).

Пробы воды и донных отложений отбирались на трех станциях оз. Большое Голубое и на 3-х станциях оз. Малое Голубое (рис. 1а, б).

Для выявления закономерностей сезонной динамики бактериальных сообществ воды и донных отложений пробы отбирались ежемесячно с декабря 2023 г. по сентябрь 2024 г. в предварительно подготовленные стерильные емкости. Для подсчета общего количества бактериальных клеток пробы воды и донных отложений фиксировали формалином.

Оценку качества воды озер проводили на основе следующих показателей: общей численности бактерий (ОЧБ), соотношению ОЧБ к количеству сапрофитов, количеству сапрофитных бактерий в соответствии с требованиями РД 52.24.309–2016. Донные отложения оценивались по ОЧБ, количеству сапрофитов, соотношению числа сапрофитов к ОЧБ, численности сульфатредукторов согласно (Дзюбан и др., 2005).

Общее количество бактериопланктона и бактериобентоса определяли методом прямого счета на мембранных фильтрах. Подсчет микроорганизмов проводили под микроскопом при объективе  $\times 90$  с окулярным микрометром ( $\times 15$ ). Численность сапрофитных бактерий определяли на селективном питательном агаре, а количество олиготрофных микроорганизмов – на среде Горбенко. Подсчитывали бактериальные колонии, вычисляли среднеарифметическое значение результатов, а также определяли среднеквадратиче-

ское отклонение. Индекс трофности высчитывали как соотношение численностей олиготрофных и сапрофитных бактерий. Количество сульфатредуцирующих бактерий определяли на модифицированной среде Баарса с помощью таблицы Мак-Креди (Колешко, 1981; Кузнецов, Дубинина, 1989; Морозова и др., 2021).

### Результаты и их обсуждение

В результате исследований установлено, что в численности бактериопланктона и бактериобентоса озер Большое Голубое и Малое Голубое можно выделить небольшие сезонные подъемы. В бактериопланктоне оз. Большое Голубое отмечены ранневесенний, весенний и позднелетний подъемы численности (рис. 2). Численность бактериопланктона на ст. 1 и 2 составляла в среднем 0.88 млн. кл./мл, на ст. 3 – 0.9 млн. кл./мл.

В динамике численности бактериобентоса оз. Большое Голубое выделялись незначительные поздневесенний и позднелетний подъемы численности (рис. 2). Численность бактериобентоса составляла в среднем  $1.04 \cdot 10^8$  кл./г донных отложений на обеих станциях отбора проб.

Количество сапрофитных бактерий в воде озера было очень низким, что характерно для чистых открытых водоемов. На ст. 1 и 2 количество сапрофитных бактерий составляло в среднем 42 и 52 кл./мл, соответственно, на ст. 3 – в среднем 148 кл./мл (рис. 3).

Интересно отметить, что в пробах воды, взятых со ст. 3 в марте, численность сапрофитных бактерий составляла 427 кл./мл, что при сравнительно низкой численности бактериопланктона 1.1 млн. кл./мл говорит о наличии слабого органического загрязнения.

Количество сапрофитных бактерий в донных отложениях озера было низким (7.1 и 7.3 тыс. кл./г), что характеризует водоем как чистый (рис. 3). С началом летнего периода количество сапрофитов повышалось, а к осени снижалось.

В составе бактериопланктона численность олиготрофных бактерий всегда была выше, чем сапрофитных, даже в период ранневесеннего подъема численности. Индекс трофности в среднем составлял 4 (табл. 1).

В донных отложениях озера численность олиготрофных бактерий также была выше численности сапрофитных в несколько раз, особенно летом. Индекс трофности также в среднем составлял 4, с началом лета индекс трофности немного повышался (табл. 1).

В динамике численности бактериопланктона в оз. Малое Голубое также были отмечены небольшие сезонные подъемы численности: зимний и

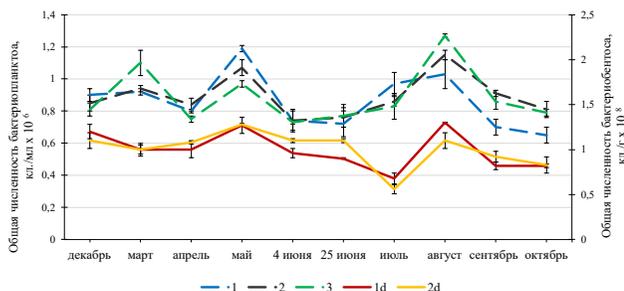


Рис. 2. Общее количество бактериопланктона и бактериобентоса в оз. Большое Голубое по станциям: 1–3 – вода; 1d, 2d – донные отложения

Fig. 2. Total number of bacterioplankton and bacteriobenthos in the Bolshoe Goluboe Lake by stations: 1–3 – water; 1d, 2d – sediments

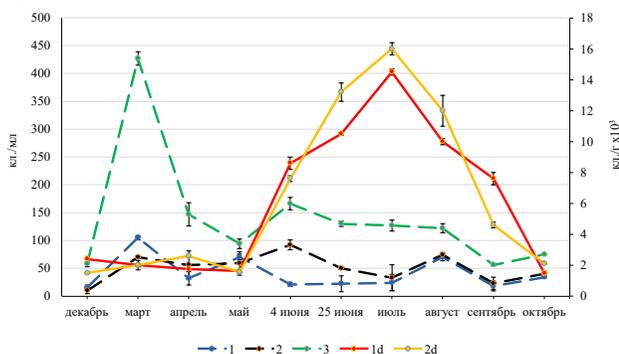


Рис. 3. Количество сапрофитных бактерий в оз. Большое Голубое по станциям: 1–3 – вода; 1d, 2d – донные отложения

Fig. 3. Number of saprophytic bacteria in Bolshoe Goluboe Lake by stations: 1–3 – water; 1d, 2d – sediments

Таблица 1. Индекс трофности воды и донных отложений оз. Большое Голубое  
Table 1. Water and sediments trophic index of Bolshoe Goluboe Lake

Период отбора Sampling period	Вода Water			Донные отложения Sediments	
	1	2	3	1d	2d
Декабрь December	2.7±0.1	5.4±0.5	2.1±0.1	2.7±0.1	4.1±0.6
Март March	4.6±0.2	3±0.25	5±0.2	2.4±0.5	3.8±0.2
Апрель April	5.3±0.1	3.3±0.1	2.6±0.3	2.2±0.1	3.5±0.2
Май May	2.6±0.3	3.4±0.1	2.4±0.3	2±0.09	3±0.01
4 июня June 4th	4.7±0.1	4.6±0.1	4.5±0.1	5.8±0.6	7±0.5
25 июня June 25th	4.7±0.27	5±0.2	6±0.2	6.2±0.5	6.5±0.3
Июль July	5±0.04	4±0.1	7.6±0.05	4±0.1	5.2±0.5
Август August	3.2±0.1	3±0.2	4.5±0.07	3.8±0.1	4.5±0.2
Сентябрь September	8±0.3	4.5±0.1	3.7±0.1	4±0.2	4.9±0.1
Октябрь October	3±0.01	2±0.1	2±0.2	2.2±0.02	1.9±0.01

весенний на обеих станциях, а также летний на ст. 2 и позднелетний на ст. 1 (рис. 4). Численность бактериопланктона на ст. 1 и 2 составляла в среднем 0.9 млн. кл./мл и 0.98 млн. кл./мл, соответственно.

Выраженных подъемов в динамике численности бактериобентоса не наблюдалось, но с началом лета численность бактериобентоса заметно снижалась, а затем плавно повышалась (рис. 4). На обеих станциях численность бактериобентоса составляла в среднем  $1.1 \cdot 10^8$  кл./г донных отложений.

Численность сапрофитных бактерий в составе

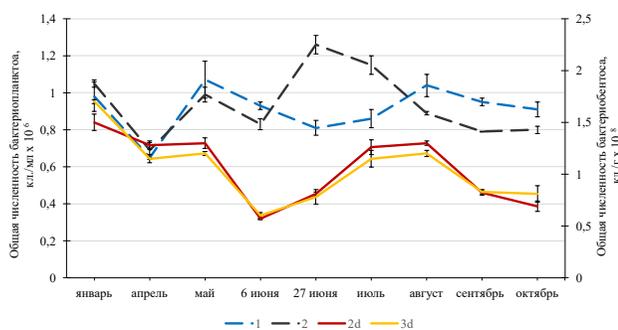


Рис. 4. Общее количество бактериопланктона и бактериобентоса в оз. Малое Голубое по станциям: 1, 2 – вода; 2d, 3d – донные отложения  
Fig. 4. Total number of bacterioplankton and bacteriobenthos in Maloe Goluboe Lake by stations: 1, 2 – water; 2d, 3d – sediments

бактериопланктона была низкой (рис. 5). Их количество составляло в среднем 49 кл./мл для ст. 1 и 132 кл./мл для ст. 2. В пробах воды, взятых со ст. 2 в январе, численность сапрофитных бактерий составляла 810 кл./мл при сравнительно низкой численности бактериопланктона 1.05 млн. кл./мл, что указывает на присутствие умеренного органического загрязнения. Стоит отметить, что в воде ст. 2 в конце июня и в июле наблюдались достаточно высокие значения численности бактериопланктона – 1.26 и 1.15 млн. кл./мл, при этом количество сапрофитов было ниже – 100 кл./мл, а показатели соотношения общего числа бактерий

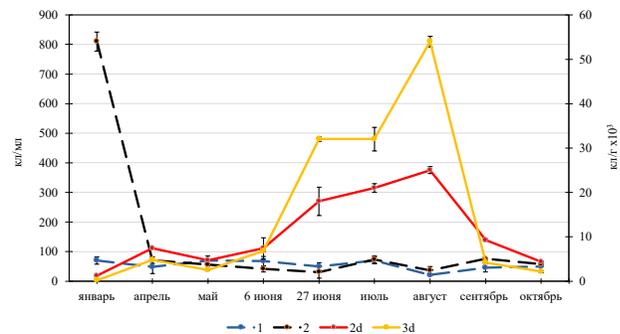


Рис. 5. Количество сапрофитных бактерий в оз. Малое Голубое по станциям: 1, 2 – вода; 2d, 3d – донные отложения  
Fig. 5. Number of saprophytic bacteria in Maloe Goluboe Lake by stations: 1, 2 – water; 2d, 3d – sediments

Таблица 2. Индекс трофности воды и донных отложений оз. Малое Голубое  
Table 2. Water and sediments trophic index of Maloe Goluboe Lake

Период отбора Sampling period	Вода Water		Донные отложения Sediments	
	1	2	2d	3d
Январь January	5.8±0.5	1.2±0.3	3.0±0.3	3.6±0.1
Апрель April	4.1±0.3	2.6±0.1	0.2±0.1	0.7±0.1
Май May	2.5±0.1	3.2±0.1	2.0±0.1	2.1±0.1
6 июня June 6th	4.2±0.2	10.0±0.9	6.8±0.2	7.0±0.4
27 июня June 27th	5.4±0.4	7.3±0.2	6.7±0.5	5.0±0.2
Июль July	5.0±0.2	5.0±0.1	4.0±0.1	4.8±0.2
Август August	3.0±0.3	3.6±0.1	2.4±0.2	2.1±0.8
Сентябрь September	4.5±0.1	3.0±0.2	2.0±0.1	3.2±0.3
Октябрь October	4.5±0.2	3.0±0.1	3.0±0.1	2.0±0.1

и сапрофитов сохранялись высокими.

Численность сапрофитных бактерий в донных отложениях оз. Малое Голубое также была низкой и на ст. 2 и 3 составляла в среднем 11 и 17 тыс. кл./г донных отложений, соответственно (рис. 5). Летом в донных отложениях озера повышалось количество сапрофитных и олиготрофных бактерий, а в сентябре снижалось. В составе бактериопланктона количество олиготрофных бактерий превышало число сапрофитов в несколько раз в

течение всего периода исследований (индекс трофности составлял в среднем 4) (табл. 2). В донных отложениях численность олиготрофных бактерий также всегда превышала количество сапрофитных в несколько раз, только в апреле наблюдался подъем численности сапрофитов, что отразилось в очень низком показателе индекса трофности (ниже 1). Это указывает на присутствие органического вещества в донных отложениях озера в данный период. С началом лета также наблюда-

Таблица 3. Средняя численность сульфатредуцирующих бактерий (наиболее вероятное число микробных кл./г) в донных отложениях озер Большое Голубое и Малое Голубое  
Table 3. Mean number of sulfate-reducing bacteria (the most likely number of microbial cells/g) in sediments of Bolshoe Goluboe and Maloe Goluboe lakes

Период отбора Sampling period	Большое Голубое Bolshoe Goluboe		Период отбора Sampling period	Малое Голубое Maloe Goluboe	
	1d	2d		2d	3d
Декабрь December	0.9	300	Январь January	600	90
Март March	1	100	–	–	–
Апрель April	250	200	Апрель April	250	250
Май May	25	25	Май May	25	25
4 июня June 4th	25	25	6 июня June 6th	25	25
25 июня June 25th	25	250	27 июня June 27th	250	250
Июль July	250	900	Июль July	600	250
Август August	600	200	Август August	250	25
Сентябрь September	90	120	Сентябрь September	250	200
Октябрь October	600	250	Октябрь October	250	250

Таблица 4. Соотношение общего количества бактериопланктона и сапрофитов в воде, сапрофитов и общего числа бактериобентоса в донных отложениях озер Большое Голубое и Малое Голубое  
 Table 4. Ratio of the total number of bacterioplankton and saprophytes in the water, as well as saprophytes and the total number of bacteriobenthos in sediments of Bolshoe Goluboe and Maloe Goluboe lakes

Оз. Большое Голубое Bolshoe Goluboe Lake						Оз. Малое Голубое Maloe Goluboe Lake				
Период отбора Sampling period	Вода Water			Донные отложения Sediments		Период отбора Sampling period	Вода Water		Донные отложения Sediments	
	1	2	3	1d	2d		1	2	2d	3d
Декабрь December	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	Январь January	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
Март March	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	–	–	–	–	–
Апрель April	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	Апрель April	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>
Май May	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	Май May	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>
4 июня June 4th	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	6 июня June 6th	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
25 июня June 25th	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	27 июня June 27th	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
Июль July	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	Июль July	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
Август August	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	Август August	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
Сентябрь September	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	Сентябрь September	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
Октябрь October	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	Октябрь October	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>

лось повышение индексов трофности, а в среднем индекс трофности в донных отложениях был на уровне 3.5 (табл. 2).

В донных отложениях Большого Голубого и Малого Голубого озер были обнаружены сульфатредуцирующие бактерии, их численность достигала 900 и 600 кл./г, соответственно (табл. 3). Количество сульфатредуцирующих бактерий немного превышало норму, что связано с гидрохимическим составом воды из-за притока высокоминерализованных сульфатно-кальциевых подземных вод.

В результате исследований установлено, что в динамике численности бактериопланктона и бактериобентоса выделяются небольшие сезонные подъемы, которые как правило, не сопровождаются повышением числа сапрофитных бактерий.

Количество сапрофитов в воде озер и в донных отложениях указывает на хорошее экологическое состояние водных объектов.

Повышение общего количества бактериопланктона и сапрофитов в пробах воды, взятых со ст. 3 оз. Большое Голубое в марте и ст. 2 оз. Малое Голубое в январе указывает на присутствие слабого загрязнения и связано с замедлением процессов бактериального самоочищения водных экосистем

зимой, что и приводит к накоплению органического вещества в водоемах (рис. 2–5). В составе бактериопланктона всегда численно преобладали олиготрофы, что указывает на низкое содержание органического вещества. Высокие индексы трофности характерны для чистых открытых водоемов и говорят о высокой продукции автохтонного органического вещества в экосистемах Голубых озер.

Показатели соотношения общего количества бактериопланктона и сапрофитов были высокими, в основном 10<sup>4</sup>, наблюдалось небольшое снижение этих показателей до 10<sup>3</sup> ранней весной и в летний период на ст. 3 Большого Голубого озера, а также в Малом Голубом озере зимой и весной на ст. 2 (табл. 4). Снижение этих показателей не отражалось на качестве воды.

Поздневесенний и летний подъем численности бактериопланктона в озерах Большое и Малое Голубое не сопровождался повышением количества сапрофитов, соответственно, показатели соотношения общего числа бактерий и сапрофитов оставались высокими, что характерно для чистых водоемов. Индексы трофности в воде оз. Малое Голубое в этот период достигали очень высоких значений (7–10), что также указывает на чистоту

озерных вод.

В донных отложениях соотношения количества сапрофитов к общему количеству бактерий постоянно были очень низкими, что свидетельствует о хорошем экологическом состоянии озерных экосистем.

### Заключение

По результатам микробиологических исследований воды и донных отложений озер Большое Голубое и Малое Голубое, согласно классификации Росгидромета, можно оценить состояние их вод как «условно чистые» I класса качества. Состояние донных отложений озер по шкале экологических модификаций соответствует «норме». Увеличение численности сапрофитов при низких значениях общего количества бактериопланктона в озерных водах зимой и ранней весной не сказывается на их качестве, но приводит к небольшому накоплению органического вещества в связи с замедлением жизнедеятельности водных микроорганизмов в холодный период.

### Список литературы

1. Акулова А.Ю., Мошарова И.В., Хазанова К.П., Голдобина Л.И. Сезонная динамика численности метаболически активного бактериопланктона на участках реки Москвы с разным уровнем биогенной нагрузки // Экология родного края: проблемы и пути их решения / Материалы XVII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Киров: ВятГУ, 2022. Кн. 2. С. 80–82.
2. Дзюбан А.Н., Косолапов Д.Б., Кузнецова И.А. Микробиологические процессы в донных отложениях Рыбинского водохранилища и озера Пleshcheevo как факторы формирования качества водной среды // Гидробиологический журнал. 2005. Т. 41, №4. С. 82–88.
3. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Маланин В.В., Марасов А.А., Шамаев Д.Е., Рупова Э.Х. Характеристика донных отложений Голубых озер г. Казани // Российский журнал прикладной экологии. 2016. №3. С. 12–19.
4. Кирюхина Е.Р., Дьякова С.А., Менькова А.В., Баубекова Д.Г. Изучение состояния среды обитания водных биологических ресурсов Северного Каспия по микробиологическим показателям // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2022. Т. 16, №11. С. 720–729.
5. Колешко О.И. Экология микроорганизмов почвы. Минск: Высшая школа, 1981. 176 с.
6. Краснова Е.С., Уманская М.В. Пространственное распределение пикосестона в Саратовском водохранилище в летний период // Поволжский экологический журнал. 2021. №2. С. 176–190. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-176-190>.
7. Краснова Е.С., Уманская М.В. Многолетняя динамика развития гетеротрофного бактериопланктона в устьевой части Усинского залива Куйбышевского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2024. №3. С. 323–330. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-323-330>.
8. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
9. Морозова О.В., Токинова Р.П., Иванов Д.В. Эколого-микробиологическая оценка качества воды озера Комсомольское в условиях урбанизации // Труды Карельского на-

учного центра РАН, сер. Лимнология. 2021. №4. С. 119–133. doi: 10.17076/lim1322.

10. Морозова О.В., Токинова Р.П., Любарский Д.С. Микробные сообщества воды и донных отложений озера Большое Голубое (Республика Татарстан) // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №3. С. 12–19. <http://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.3.13.20>.

11. РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши.

12. Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского университета, 2001. 256 с.

13. Chen X., Wang K., Guo A., Dong Z., Zhao Q., Zhang D. Excess phosphate loading shifts bacterioplankton community composition in oligotrophic coastal water microcosms over time // Journal of experimental marine biology and ecology. 2016. Vol. 483. P. 139–146. doi: 10.1016/j.jembe.2016.07.009.

14. Diaz-Torres O., Lugo-Melchor O.Y., de Anda J., Pacheco A., Yebrá-Montes C., Gradilla-Hernandez M. S., Senes-Guerrero C. Bacterial dynamics and their influence on the biogeochemical cycles in a subtropical hypereutrophic lake during the rainy season // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. 832477. doi: 10.3389/fmicb.2022.832477.

15. Gilbert J. J. Food niches of planktonic rotifers: Diversification and implications // Limnology and Oceanography. 2022. Vol. 67, №10. P. 2218–2251. <https://doi.org/10.1002/lno.12199>.

16. Jiang R.M., Wang D.P., Jia S.Y., Li, Q.S., Liu S.N., Zhang X.X. Dynamics of bacterioplankton communities in the estuary areas of the Taihu Lake: Distinct ecological mechanisms of abundant and rare communities // Environmental research. 2024. Vol. 242. 117782. doi: 10.1016/j.envres.2023.117782.

17. Romanenko A.V. Seasonal dynamics of the structural and functional organization of heterotrophic bacterioplankton in the mouth area of the small Il'd River // Inland Water Biology. 2023. Vol. 16, Suppl. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1134/S199508292307012X>.

18. Stoeck T., Frühe L., Forster D., Cordier T., Martins C. I. M., Pawlowski J. Environmental DNA metabarcoding of benthic bacterial communities indicates the benthic footprint of salmon aquaculture // Marine pollution bulletin. 2018. Vol. 127. P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.065>.

19. Zhang W.Y., Ye J.Q., Liu X.H., Zhang Y.L., Zhang J.Y., Shen L.Y., Jin Y., Zhang J.H., Li H.J. Spatiotemporal dynamics of bacterioplankton communities in the estuaries of two differently contaminated coastal areas: Composition, driving factors and ecological process // Marine pollution bulletin. 2024. Vol. 201. 116263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116263>.

### References

1. Akulova A.Yu., Mosharova I.V., Hazanova K.P., Goldobina L.I. Sezonnaya dinamika chislennosti metabolicheskii aktivnogo bakterio planktona na uchastkah reki Moskvy s raznym urovnem biogennoj nagruzki [Seasonal dynamics of the number of metabolically active bacterioplankton in sections of the Moskva river with different levels of biogenic load] // Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya [Ecology of the native land: problems and ways to solve them] / Materialy XVII Vser. nauch. prakt. konf. s mezhd. uchastiem. Kirov: VyatGU, 2022. Kn. 2. P. 80–82.
2. Dzuban A.N., Kosolapov D.B., Kuznecova B.B. Mikrobiologicheskie processy v donnyh otlozheniyah Rybinskogo vodohranilishcha i ozera Pleshcheevo kak faktory formirovaniya kachestva vodnoj sredy [Microbiological processes in bottom sediments of Rybinsk reservoir and Pleshcheevo Lake as factors in formation of the quality of aquatic environment] // Gidrobiologicheskij zhurnal [Hydrobiological journal in Russian]. 2005. Vol.

41, No 4. P. 82–88.

3. Ivanov D.V., Ziganshin I.I., Malanin V.V., Marasov A.A., Shamaev D.E., Rupova E.H. *Harakteristika donnyh otlozhenij Golvubyyh ozer g. Kazani* [Characteristics of the Golubye lakes sediments of Kazan] // *Rossiiskij zhurnal prikladnoj ekologii*. [Russian journal of applied ecology]. 2016. No 3. P. 12–19.

4. Kiryuhina E.R., Dyakova S.A., Menkova A.V., Baubekova D.G. *Izuchenie sostoyaniya sredy obitaniya vodnyh biologicheskikh resursov Severnogo Kaspiya po mikrobiologicheskim pokazatelyam* [Studying the state of the habitat of water biological resources of the Northern Caspian on microbiological indicators] // *Rybovodstvo i rybnoe hozyajstvo* [Fish farming and fisheries]. 2022. Vol. 16, No 11. P. 720–729.

5. Koleshko O.I. *Ekologiya mikroorganizmov pochvy: Laboratornyj praktikum* [Ecology of microorganisms of soil: Laboratory practice]. Minsk: Vysshaya shkola, 1981. 175 p.

6. Krasnova E.S., Umanskaya M.V. *Prostranstvennoe raspredelenie pikosestona v Saratovskom vodohranilishche v letnij period* [Spatial distribution of picoseston in the Saratov reservoir in summer] // *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal* [Povolzhskiy journal of ecology]. 2021. No 2. P. 176–190. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-323-330>.

7. Krasnova E.S., Umanskaya M.V. *Mnogoletnyaya dinamika razvitiya geterotrofnogo bakterioplanktona v ust'vojj chasti Usinskogo zaliva Kujbyshevskogo vodohranilishcha* [Long-term dynamics of the heterotrophic bacterioplankton development in the mouth of the Usinsky bay of the Kuibyshev reservoir] // *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal* [Povolzhskiy journal of ecology]. 2024. No 3. P. 323–330. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-323-330>.

8. Kuznecov S.I., Dubinina G.A. *Metody izucheniya vodnyh mikroorganizmov* [Methods of investigation of water microorganisms]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p.

9. Morozova O.V., Tokinova R.P., Ivanov D.V. *Ekologomikrobiologicheskaya ocenka kachestva vody ozera Komsomol'skoe v usloviyah urbanizacii* [Ecological and microbiological assessment of Lake Komsomolskoye water quality under urbanization] // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN, ser. Limnologiya* [Proceedings of the Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences, ser. Limnology]. 2021. No 4. P. 119–133. doi: 10.17076/lim1322]

10. Morozova O.V., Tokinova R.P., Lyubarskii D.S. *Mikrobnnye soobshchestva vody i donnyh otlozhenij ozera Bol'shoe Goluboe (Respublika Tatarstan)* [Microbial communities of water and sediments of Bolshoe Goluboe Lake (the Republic of Tatarstan)] // *Rossiiskij zhurnal prikladnoj ekologii* [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 3. P. 12–19. doi: 10.24852/2411-7374.2022.3.13.20

11. RD 52.24.309–2016. *Organizaciya i provedenie rezhimnyh nablyudenij za zagryazneniem poverhnostnyh vod sushi* [Organization and conduct of regime monitoring of land surface water pollution].

12. *Unikal'nye ekosistemy solonovatovodnyh karstovyh ozer Srednego Povolzh'ya* [Unique ecosystems of brackish-water karst lakes of the Middle Volga region]. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 2001. 256 p.

13. Chen X., Wang K., Guo A., Dong Z., Zhao Q., Zhang D. *Excess phosphate loading shifts bacterioplankton community composition in oligotrophic coastal water microcosms over time* // *Journal of experimental marine biology and ecology*. 2016. Vol. 483. P. 139–146. doi: 10.1016/j.jembe.2016.07.009.

14. Diaz-Torres O., Lugo-Melchor O.Y., de Anda J., Pacheco

A., Yebra-Montes C., Gradilla-Hernandez M. S., Senes-Guerrero C. *Bacterial dynamics and their influence on the biogeochemical cycles in a subtropical hypereutrophic lake during the rainy season* // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. 832477. doi:10.3389/fmicb.2022.832477.

15. Gilbert J.J. *Food niches of planktonic rotifers: Diversification and implications* // *Limnology and Oceanography*. 2022. Vol. 67. No 10. P. 2218–2251. <https://doi.org/10.1002/lno.12199>

16. Jiang R.M., Wang D.P., Jia S.Y., Li Q.S., Liu S.N., Zhang X.X. *Dynamics of bacterioplankton communities in the estuary areas of the Taihu Lake: Distinct ecological mechanisms of abundant and rare communities* // *Environmental research*. 2024. Vol. 242. 117782. doi: 10.1016/j.envres.2023.117782.

17. Romanenko A.V. *Seasonal dynamics of the structural and functional organization of heterotrophic bacterioplankton in the mouth area of the small Il'd River* // *Inland Water Biology*. 2023. Vol. 16, Suppl 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1134/S199508292307012X>.

18. Stoeck T., Frühe L., Forster D., Cordier T., Martins C.I.M., Pawlowski J. *Environmental DNA metabarcoding of benthic bacterial communities indicates the benthic footprint of salmon aquaculture* // *Marine pollution bulletin*. 2018. Vol. 127. P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.065>.

19. Zhang W.Y., Ye J.Q., Liu X.H., Zhang Y.L., Zhang J.Y., Shen L.Y., Jin Y., Zhang J.H., Li H.J. *Spatiotemporal dynamics of bacterioplankton communities in the estuaries of two differently contaminated coastal areas: Composition, driving factors and ecological process* // *Marine pollution bulletin*. 2024. Vol. 201. P. 116263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116263>.

---

Morozova O.V., Berdnik S.V., Lyubarsky D.S. **Assessment of Bolshoe Goluboe and Maloe Goluboe lakes ecological status by means of microbiological indicators in seasonal dynamics.**

The seasonal dynamics of the bacterioplankton and bacteriobenthos abundance data in Bolshoe Goluboe and Maloe Goluboe lakes are presented. The bacterioplankton total number in the reservoirs ecosystems varied in the range of 0.65–1.27 million cells/ml, the number of saprophytes was low, the ratio of the total number of bacterioplankton and saprophytic bacteria was at  $10^4$ , sometimes decreased to  $10^3$ . According to all indicators, the water quality was assessed as «conditionally clean». The total number of bacteriobenthos in the bottom sediments of reservoirs varied slightly in the range of 57–128 million cells/g, the number of saprophytes and the ratio of saprophytes number to the total number of bacteria were low, according to all indicators, the bottom sediments state was assessed as normal.

*Keywords:* bacterioplankton; bacteriobenthos; saprophytic bacteria; water quality; Golubye lakes.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

**Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 22.04.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 06.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 16.05.2025

**Информация об авторах**

Морозова Ольга Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: oollggaa@mail.ru.

Бердник Сергей Владимирович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: svberdник@mail.ru.

Любарский Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: lds57@mail.ru.

**Information about the authors**

Olga V. Morozova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurская st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: oollggaa@mail.ru.

Sergey V. Berdник, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurская st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: svberdник@mail.ru.

Dmitrii S. Lyubarsky, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurская st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: lds57@mail.ru



*Р.П. Токинова, К.И. Абрамова, Л.К. Галиахметова,  
С.В. Бердник, Р.Р. Шагидуллин*

*Институт проблем экологии и недропользования АН РТ r.tokin@rambler.ru*

## БИОИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА АРХИЕРЕЙСКОЕ ПО СТРУКТУРЕ ПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ

В 2024 г. проведено обследование оз. Архирейское (Республика Татарстан) с целью оценки его экологического состояния и возможных рисков, связанных с застройкой его водосборной территории. На основании результатов исследования химических свойств озерных вод, видового состава и количественной структуры фито- и зоопланктона дана оценка биологическому разнообразию, уровню органического загрязнения и трофического статуса озера на различных участках его акватории.

*Ключевые слова:* пресноводные экосистемы; биоразнообразие; планктон; биоиндикация; озеро Архирейское.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.39.50>

### Введение

Архирейское (Тарлашинское) – одно из наиболее крупных и глубоких озер в Республике Татарстан. Расположено в Западном Предкамье, в левобережье долины р. Волги, на высокой надпойменной террасе, у с. Тарлаши (Озера..., 1976). Озеро вытянуто в меридиональном направлении. Его площадь составляет 64.6 га, длина 2570 м, максимальная ширина 480 м (средняя 251 м), средняя глубина 6 м (Зиганшин и др., 2017). Водоем карстово-суффозионного происхождения, имеет устойчивое подземное питание. На дне озера расположена цепочка карстовых провалов, наибольшие из которых имеют глубину 8.9 м в северной и около 21 м в центральной части озера.

Озеро Архирейское с 1978 г. имеет статус особо охраняемой природной территории и является памятником природы регионального значения (Государственный..., 2007). В настоящее время используется как местный источник водных и рекреационных ресурсов жителями с. Тарлаши, расположенного в северной части озера, и садовых товариществ, находящихся в 0.4–1.5 км к западу от озера. Селитебные территории представляют собой наиболее значимый источник загрязнения вод озера, поскольку частные домовладения не оборудованы системами централизованного водоснабжения и канализации; сброс хозяйственно-бытовых сточных вод осуществляется в негерметичные выгребные ямы или на рельеф местности. Несоблюдение режима водоохранной зоны,

застройка береговой зоны вплоть до уреза воды приводит к повышенной антропогенной нагрузке на экосистему озера. Хозяйственно-бытовое загрязнение поверхностного стока и грунтовых вод, забор подземных вод из скважин могут негативно отражаться на водном режиме озера, качестве его вод и на ускорении темпов эвтрофирования озерной экосистемы.

При оценке состояния экосистемы водоемов и качества вод биологическое разнообразие и количественная структура сообществ гидробионтов являются важными показателями, чутко реагирующими на происходящие изменения. Впервые изучение гидробиологических сообществ оз. Архирейского проведено в 1997 г. в рамках исследований сети ООПТ, охватившей более 50 наземных и водных объектов Республики Татарстан (Совершенствование сети..., 1997). Полученные при этом результаты по планктонным и бентосным гидробионтам, однако, не получили освещения в научных публикациях и вошли лишь в краткие аннотации к водоемам в «Государственном реестре особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан (2007)».

В 2024 г. проведено комплексное обследование оз. Архирейское и его водосборной территории с целью оценки современного состояния экосистемы и возможных рисков, связанных с реализацией проектов жилой застройки на западном и восточном берегах водоема. Осуществлены гидрохимические,

батиметрические, гидробиологические и ряд других исследований. Изучены видовой состав и количественная структура планктонных сообществ, зообентоса и водной растительности, которые являются одними из основных гидробиологических показателей при биоиндикации уровня органического загрязнения и трофического статуса водных объектов.

Цель работы – на основании результатов исследования химических свойств озерных вод, состава и структуры фито- и зоопланктона дать оценку биологическому разнообразию и экологическому состоянию оз. Архирейское в настоящий период времени.

### Материалы и методы исследований

Гидробиологические исследования оз. Архирейское проведен в июле – августе 2024 г. (даты: 2.07, 4.07, 15.08). При рекогносцировочном обследовании в озере выделено три участка, различающихся по морфометрическим и батиметрическим характеристикам (рис. 1). Центральный участок охватывает наиболее широкую и глубоководную (глубина до 21 м) акваторию озера. Северный участок, на дне которого имеются карстовые провалы глубиной до 9 м, обособлен от центральной акватории глубоко вдающимся мысом, который существенно ограничивает водообмен с остальной частью озера. Мыс представляет собой конус выноса терригенного материала из оврага, дренирующего сток в западной части с. Тарлаши. Южный участок – это наиболее мелководная часть озера с двумя заливами, без карстовых провалов, с глубинами 1–2 м и менее; его дно полностью заросло водными макрофитами (элодея, роголистник).

Для отбора проб воды на химический анализ и сбора биологического материала на каждом из выделенных участков заложено по одной станции. Станции на северном и центральном участках озера расположены над районом максимальных глубин. Отборы проб фито- и зоопланктона из поверхностного слоя озера (до 0.2 м) проведены путем зачерпывания воды; из глубоководных горизонтов (июль): ст. 1 – глубина 5 м, ст. 2 – глубины 7 и 15 м – с использованием батометра Молчанова. Объем пробы фитопланктона (9 проб) составил 0.5 л, зоопланктона (9 проб) – 20 л (поверхность) и 7.5 л (5, 7 и 15 м). Одновременно проведены измерения температуры и прозрачности воды (при помощи диска Секки). Сбор материала и его камеральная обработка выполнены в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками (Методика..., 1975; Методические

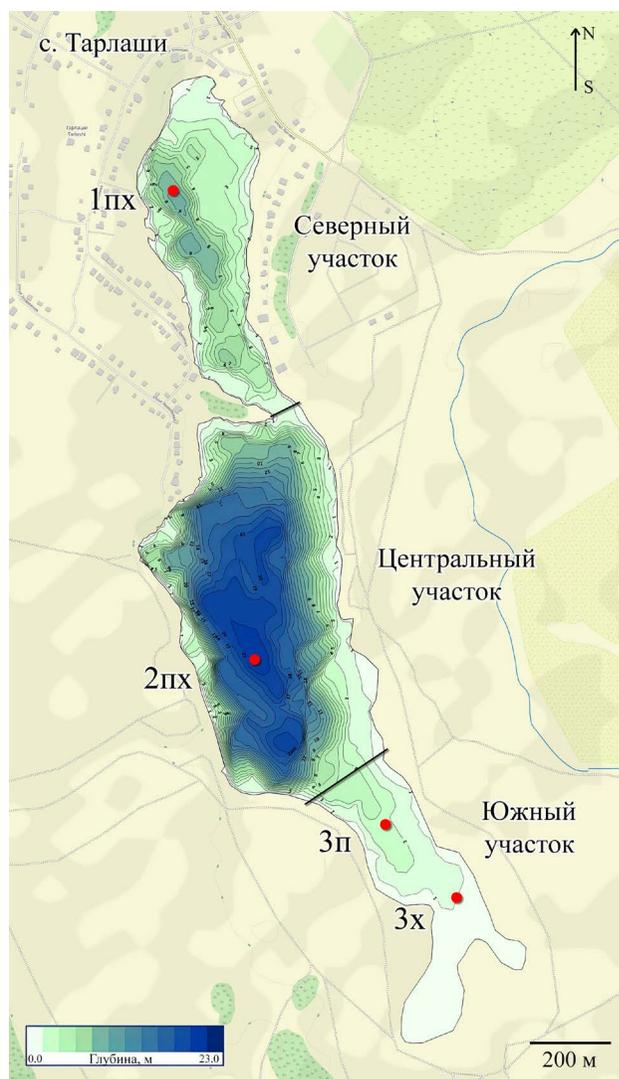


Рис. 1. Озеро Архирейское, расположение станций (1–3) отбора гидрохимических (х) и планктонных (п) проб  
 Fig. 1. Arkhieriyskoe Lake, stations for hydrochemical (x) and planktonic (n) sampling (1–3)

..., 1982; Руководство ..., 1983).

Для идентификации таксономической принадлежности обнаруженных организмов водорослей и животных использованы определительные ключи (Определитель пресноводных ..., 1951–1982; Царенко, 1990; Определитель зоопланктона ..., 2010; Komárek, Anagnostidis, 1998; Komárek, Anagnostidis, 2005; Komárek, 2013). Для описания структуры биологических сообществ рассчитаны показатели, обычно используемые в гидроэкологических исследованиях: число видов, индексы видового разнообразия Шеннона ( $H_N$ , бит) и выравненности сообщества Пиелу ( $E_N$ ), общая и относительная численность и биомасса сообществ и отдельных таксонов. Для анализа экологической значимости видов зоопланктона

проведены расчеты индекса доминантности  $D_i$  по формуле Палия-Ковнацки (Шитиков и др., 2003); из организмов фитопланктона к доминирующим отнесены виды, составляющие  $\geq 10\%$  от общей численности и/или биомассы (Фитопланктон ..., 2003). Оценка уровня органического загрязнения вод проведена путем расчета индекса сапробности Пантле-Букка ( $S$ ) по составу и обилию видов-индикаторов сапробности (Руководство ..., 1983; Wegl, 1983; Макрушин, 1974; Барина и др., 2006); уровень загрязнения водоема оценивался по значению  $S$ : от 0.5 до 1.5 – очень чистые и чистые воды (олигосапробная зона); от 1.5 до 2.5 – умеренно загрязненные воды ( $\beta$ -мезосапробная зона); от 2.5 до 3.5 – загрязненные воды ( $\alpha$ -мезосапробная зона); от 3.5 до 4.0 и выше – грязные и очень грязные воды ( $\rho$ -сапробная зона). Для установления трофности водоема вычислен индекс трофности ИТ (Милиус, Кывасик, 1979; цит. по: Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020) по формуле:  $Ib=44.87+23.22 \cdot \log B$ , где  $B$  – общая биомасса водорослей в пробе; также определена концентрация в воде общего фосфора  $P_{\text{общ}}$ .

Сходство таксономического состава гидробионтов на исследованных участках оценивалось методом кластерного анализа в программе MS Excel. Сходство данных оценивали методом попарных сравнений с помощью индекса Сьёренсена, индекс выражен в процентах. При кластеризации данных по фитопланктонным водорослям использован метод Варда, в качестве метрики – нормированное евклидово расстояние, выраженное в процентах (Шитиков и др., 2003). Кластеризация данных по зоопланктону проведена методом средневзвешенного среднего (Андреев, 1980).

Гидрохимический мониторинг озера проведен

в вегетационный период 2024 г. (даты: 21.05, 17.06, 09.07 и 06.08). Отбор проб воды выполнен на выделенных станциях из поверхностного слоя и придонных слоев. Всего проанализировано 19 проб воды по 11 показателям. При анализе качества вод полученные значения сопоставлены с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) веществ для водоемов рыбохозяйственного значения (Приказ ..., 2016) и культурно-бытового водопользования (СанПин 1.2.3685–21).

### Результаты и их обсуждение

*Гидрофизические и гидрохимические показатели водной массы оз. Архирейское.* Физико-оптические свойства воды распределены по акватории озера неравномерно (табл. 1). Наибольшей прозрачностью выделяются воды на центральном (3.0–3.5 м) и южном (более 2.2–2.7 м) участках озера, тогда как на северном участке наблюдается ее заметное снижение (1.8–2.1 м). По данному показателю, в соответствии с классификацией С.П. Китаева (1984), оз. Архирейское относится к озерам со средней прозрачностью.

Воды озера характеризуются весьма низкими значениями минерализации. По О.А. Алекину (1953), их можно отнести к водам малой и очень малой минерализации; по классификации А.М. Овчинникова (Справочник ..., 1989) – к ультрапресным. В поверхностных слоях (май–август) колебания значений происходят в пределах 84–115 мг/дм<sup>3</sup>, в придонных слоях глубоководных зон – 111–138 мг/дм<sup>3</sup>. Вода очень мягкая: средне-сезонная величина жесткости на поверхности находится на уровне 1.22–1.38 °Ж, в глубинной зоне – 1.51–1.73 °Ж. По составу основных ионов

Таблица 1. Температура поверхностного слоя и прозрачность воды в оз. Архирейское

Table 1. Surface layer temperature and water transparency in Arkhiereiskoe Lake

Участок озера Lake section	Даты Dates	Прозрачность, м Transparency, m	Глубина, м Depth, m	Температура, °С Temperature, °C
Северный	4.07.2024	2.0–2.1	0–0.2	27.4–27.8
			5.0	21.5
Центральный	2.07.2024	3.0	0–0.2	24.8–25.5
			7.0	19.4
			15.0	13.4
	15.08.2024	3.5	0–0.2	20.2
Южный	2.07.2024	до дна (> 2.2 м)	0–0.2	26.6–26.8
	15.08.2024	до дна (> 2.7 м)	0–0.2	20.2

озерная вода относится к гидрокарбонатному классу магниевых-кальциевой группы. Водородный показатель характеризует реакцию среды в поверхностных слоях озера как слабощелочную-щелочную (рН 7.93–9.45); в придонных слоях – как нейтральную (рН 6.93–7.22). Незначительные вариации величин свидетельствуют о довольно стабильном химическом составе вод озера как в сезонной динамике, так и в пространственном аспекте. Помимо того, сравнение текущих показателей с данными предшествующих лет (Совершенствование ..., 1997; Водные объекты ..., 2018) не позволяет выявить существенных изменений по показателям уровня минерализации и соотношения основных ионов водной массы озера за прошедший период времени.

Приблизительно таким же остается и уровень прозрачности вод – в 1997 г. он составлял 2.5 м (Совершенствование ..., 1997).

Распределение растворенного кислорода в оз. Архирейское имеет закономерный для озерных экосистем характер, на поверхности его концентрация находится в норме (9.4–11.70 мг/дм<sup>3</sup>), в придонных слоях максимальных глубин (карстовые провалы) – значительно понижена (0.9–1.7 мг/дм<sup>3</sup>). В отдельные периоды наблюдений в придонных слоях озера зафиксированы превышения предельно допустимой концентрации сульфидов и сероводорода: в июле в центральной части – до 0.06 мг/дм<sup>3</sup>, в августе в северной – до 0.09 мг/дм<sup>3</sup>.

Суммарное содержание в воде легкоокисля-

Таблица 2. Основные показатели структуры фитопланктона в оз. Архирейское  
Table 2. Main indicators of phytoplankton structure in Arkhiereiskoe Lake

Показатели Indicators	2.07.24, 4.07.24						15.08.24		
	ст. 1		ст. 2			ст. 3	ст. 1	ст. 2	ст. 3
Глубина, м Depth, m	0.5 м	5 м	0.5 м	7 м	15 м	0.5 м	0.5 м		
Численность, млн кл./л Abundance, mln. cells/l	7.09	2.31	5.20	1.30	0.53	1.76	68.67	2.84	3.38
Биомасса, мг/л Biomass, mg/l	0.80	1.72	0.54	1.87	3.10	0.41	2.49	0.39	0.29
Плотность видов в пробе Species density in a sample	16	15	18	9	12	24	27	14	12
Индекс видового разнообразия, $H_N$ Species diversity index, $H_N$	2.35	1.99	1.49	0.90	0.65	2.41	1.96	1.51	1.63
$E_N$ , индекс выравненности $E_N$ , evenness index	0.74	0.71	0.58	0.39	0.65	0.80	0.47	0.54	0.63
Индекс сапробности, $S$ Saprobic index, $S$	2.27	2.0	2.26	2.03	1.70	2.22	недостаточно данных		

Таблица 3. Доминирующие виды в фитопланктоне поверхностного горизонта вод оз. Архирейское  
Table 3. Surface phytoplankton dominant species in Arkhiereiskoe Lake

Отделы Divisions	ст. 1	ст. 2	ст. 3
Июль			
Цианопхита	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> Ralfs ex Bornet & Flahault		<i>A. flos-aquae</i> <i>A. flos-aquae</i>
Хлорофита	<i>Coenococcus</i> sp.		<i>Coenococcus</i> sp. <i>Coenococcus</i> sp.
Август			
Цианопхита	<i>Coelosphaerium confertum</i> West & G.S. West <i>Snowella rosea</i> (J.W.Snow) Elenkin		<i>A. flos-aquae</i> <i>A. flos-aquae</i> <i>C. confertum</i> <i>S. rosea</i>

емых органических веществ оценивалось по величине биологического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>), используемого в качестве одного из основных измерителей количества загрязняющих веществ, поступающих в водоемы с хозяйственно-бытовыми сточными водами. В период наблюдений в поверхностном слое озера значение БПК<sub>5</sub> находилось в пределах ПДК<sub>рх</sub> или незначительно (не более чем в 1.4 раза) превышало его. И лишь в северной части озера в июле – августе наблюдался его рост до 3.52–4.63 мгО<sub>2</sub>/л (1.7–2.2 ПДК<sub>рх</sub>). Также превышение фиксировалось все летние месяцы в придонном слое этого участка, с максимумом до 7.2 мгО<sub>2</sub>/л (3.4 ПДК<sub>рх</sub>) в августе.

Общее содержание органических веществ (по величине ХПК) на поверхности озера находилось в пределах нормы – 23–29 мг/дм<sup>3</sup>. Для озера с макрофитным типом зарастания эти значения можно рассматривать как фоновые, обусловленные протеканием природных процессов синтеза и разложения органических веществ. Незначительные отклонения от нормативных значений (1.2–1.6 ПДК<sub>кб</sub>) отмечены лишь в мае, причем одновременно на всех трех станциях. Более значительные

отклонения – 4 ПДК<sub>кб</sub> в июле и 8 ПДК<sub>кб</sub> в августе – зафиксированы в придонном слое северной части озера.

Содержание общего фосфора в поверхностном горизонте оз. Архирейское в период наблюдений изменялось незначительно, в пределах 0.014–0.041 мг/дм<sup>3</sup>. Его средне-сезонное значение составило 0.03 мг/дм<sup>3</sup> в северной и южной частях, и 0.02 мг/дм<sup>3</sup> – в центральной части озера. В придонном горизонте северного и центрального участков средние значения показателя повышались до 0.2 мг/дм<sup>3</sup>, что связано с образованием здесь нерастворимых форм фосфатов.

*Видовой состав и количественное развитие планктонных сообществ.* В фитопланктоне оз. Архирейское обнаружено 68 видов из семи таксономических групп: Cyanoprokaryota (цианопрокаримы, или Cyanophyta – синезеленые водоросли), Cryptophyta (криптофитовые), Euglenophyta (эвгленовые), Chlorophyta (зеленые), Dinophyta (динофитовые), Bacillariophyta (диатомовые) и Charophyta (харофитовые). Основа озерной альгофлоры формируется за счет представителей зеленых (27 видов) и синезеленых (18 видов) водорослей.

Общие количественные показатели фитопланктона в водоеме варьируют как во временной (от месяца к месяцу), так и в пространственной динамике (табл. 2). В середине лета (июль) его обилие в поверхностном слое воды носит умеренный характер. На разных участках озера численность изменяется в пределах 1.8–7.1 млн кл./л, биомасса не превышает 1 мг/л. Незначительное усиление роста фитопланктона отмечается в направлении к акватории северной части озера. Таксономическую структуру сообщества формируют представители цианопрокаримов пор. Nostocales (*Aphanizomenon flos-aquae*) и зеленых водорослей пор. Sphaeropleales (*Coenococcus* sp.) (табл. 3). Доминирующая роль по численности и биомассе принадлежит цианопрокаримам и зеленым водорослям, образующим совместно 92–100% численности и 52–100% биомассы фитопланктона (рис. 2). В южной части озера в биомассе фитопланктона заметно усиливается участие харофитов (*Cosmarium* sp.).

В вертикальном распределении отмечается снижение численности и рост биомассы фитопланктона с глубиной (табл. 2). Это обусловлено сменой доминирования цианопрокаримов и зеленых водорослей на представителя динофитовых водорослей *Ceratium hirundinella* (Müller) Dujardin. Данный крупноклеточный вид, присутствуя в небольшом числе (2–17% от общей численности), но обладая тяжеловесным панцирем,

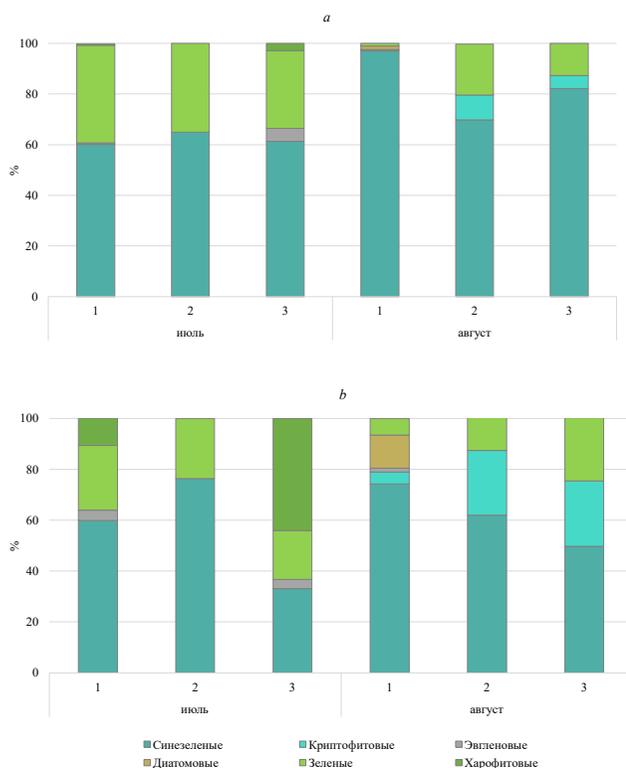


Рис. 2. Вклад водорослей разных отделов в формирование общей численности (а) и биомассы (б) фитопланктона в поверхностном слое оз. Архирейское; 1–3 – номера станций

Fig. 2. Contribution of algae different divisions into total abundance (a) and biomass (b) of phytoplankton in surface of Arkhiereiskoe Lake; 1–3 – station numbers

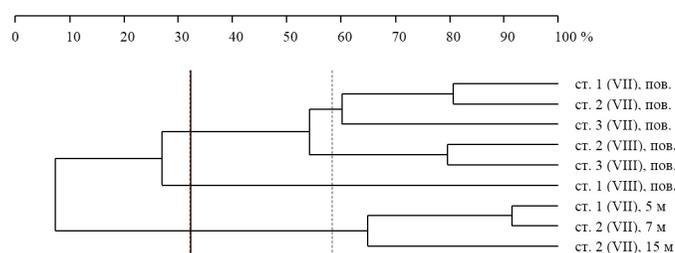


Рис. 3. Дендрограмма сходства исследованных станций по биомассе отделов фитопланктона в оз. Архирейское

Fig. 3. Dendrogram of stations similarity by biomass of phytoplankton divisions in Arkhiereiskoe Lake

вносит основной вклад в формирование биомассы фитопланктона (85–99%) на горизонтах 5, 7 и 15 м. Его доминирование в глубоководной зоне объясняется наличием конкурентных преимуществ перед другими микроводорослями – способностью к миксотрофному (смешанному) питанию, активному передвижению в воде в поисках оптимальных условий для питания и толерантностью к условиям недостаточности света.

Отдельно следует отметить распространение в озере харофитов, представленных десмидиевыми водорослями из родов *Cosmarium*, *Closterium*, *Spondylosium*, *Staurastrum* и *Xanthidium*. Десмидиевые известны как индикаторы, чувствительные к среде обитания, и их присутствие в планктоне может свидетельствовать об определенных гидрохимических условиях в озере. В целом, их обилие в фитопланктоне невысокое (не превышает 10% от общих показателей). Вместе с тем, неравномерное распределение этой группы водорослей по акватории озера и в градиенте глубин указывает на дискретность в распределении физико-химических показателей воды. Согласно анализу экологических предпочтений десмидиевых водорослей (Неудахина, Анисимова, 2022), наибольшим загрязнением характеризуются глубинные зоны оз. Архирейское и его северная часть. Наибольшее число видов (8) отмечается в поверхностном слое, с глубиной (7–15 м) их разнообразие снижается до двух (*Closterium aciculare* West и *Staurastrum* sp.). Наиболее богат десмидиевыми центральный участок озера (ст. 2), менее – южный (ст. 3). Условия на северном участке озера (ст. 1) неблагоприятны для их развития, здесь число десмидиевых минимально (*Staurastrum*).

В августе, в поверхностном слое центрального и южного участков озера, количественное обилие фитопланктона продолжает носить умеренный характер. Также, в структуре фитопланктона ведущие роли принадлежат цианопрокариотам и

зеленым водорослям; более заметную роль начинают играть диатомовые (ст. 1) и криптофитовые (ст. 2 и 3). Представители харофитовых водорослей при этом выпадают из числа доминантов и субдоминантов. На этом фоне отмечено значительное увеличение общей численности и биомассы фитопланктона до 68.67 млн кл./л и 2.49 мг/л в северной части озера. Этот рост обусловлен доминированием представителей цианопрокариот, доля которых в численности и биомассе достигает 97% и 74%, соответственно. При этом развитие получают преимущественно представители порядков Chroococcales (*C. confertum*, *S. rosea*) и Nostocales (*A. flos-aquae*).

При проведении кластеризации основных отделов фитопланктона по биомассе (рис. 3) выделяются три кластера со степенью сходства менее 30%. В отдельный кластер объединяется фитопланктон глубинных горизонтов, сходство которого с поверхностным составляет менее 10%. Второй кластер образует фитопланктон почти всех исследованных поверхностных проб и третий, обособленный от них – фитопланктон северного участка, отобранный в августе. Таким образом, в августе на ст. 1 формируется особая структура фитопланктона, отличающаяся от таковых на ст. 2 и 3. Здесь, в отличие от других станций, отмечено присутствие диатомовой водоросли *Aulacoseira* sp. и многообразие видов цианопрокариот.

В зоопланктоне озера обнаружено 27 видов беспозвоночных животных из трех таксономических групп. Наиболее высоким видовым богатством представлены коловратки – 16 видов; ветвистоусые и веслоногие ракообразные – по 7 и 4 вида, соответственно (табл. 4).

К доминантным формам зоопланктона в озере следует отнести веслоногих рачков *Eudiaptomus graciloides* (Di 20.02), к субдоминантным – коловраток *Pompholyx sulcata* (1.61) и *Kellicottia longispina* (1.66), ветвистоусых рачков *Bosmina coregoni* (9.99) и *Daphnia cucullata* (9.99), веслоногих рачков *Cyclops strenuus* (4.3), *Mesocyclops leuckarti* (1.82) и *Thermocyclops crassus* (5.72).

В поверхностных слоях озера численность зоопланктона в первый месяц наблюдений (июль) изменяется в пределах 74–134 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 0.27–1.12 г/м<sup>3</sup> (табл. 5). Ведущая роль в количественной структуре сообщества принадлежит веслоногим рачкам, представленным преимущественно личиночными формами, доля которых в общей численности составляет 86–98% (рис. 4). По биомассе эта группа также доминирует на большей части акватории озера (центральный и южный участки) – 92–93%, тогда как на се-

Таблица 4. Видовой состав зоопланктона оз. Архиерейское с указанием индикаторной значимости  
Table 4. Species composition of zooplankton in Arkhiereiskoe Lake with indicator significance

№	Виды/станции Species/stations	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Сапроб- ность Saprobity	Индекс сапробности Saprobic index
Тип Rotifera – Коловратки						
1	<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse, 1850	+			<i>o, β</i>	1.6
2	<i>Brachionus angularis</i> Gosse, 1851			+	<i>β, α</i>	2.5
3	<i>Brachionus diversicornis</i> (Daday, 1883)	+			<i>β</i>	2.0
4	<i>Brachionus quadridentatus</i> Hermann, 1783	+			<i>β</i>	2.2
5	<i>Conochilus unicornis</i> Rousselet, 1892		+		<i>o</i>	1.3
6	<i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg, 1834)	+			<i>β, α</i>	2.3
7	<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott, 1879)	+	+	+	<i>o, β</i>	1.4
8	<i>Keratella cochlearis</i> (Gosse, 1851)	+			<i>β</i>	1.9
9	<i>Keratella quadrata</i> (Müller, 1786)	+	+	+	<i>β</i>	1.7
10	<i>Lecane luna</i> (Müller, 1776)	+			<i>o, β</i>	1.6
11	<i>Lepadella patella</i> (Müller, 1773)	+			<i>β</i>	1.7
12	<i>Polyarthra euryptera</i> Wierzejski, 1891	+	+	+	<i>o</i>	1.2
13	<i>Pompholyx sulcata</i> Hudson, 1885	+			<i>β</i>	1.7
14	<i>Synchaeta pectinata</i> Ehrenberg, 1832		+	+	<i>o, β</i>	1.7
15	<i>Trichocerca capucina</i> (Wierzejski & Zacharias, 1893)	+			<i>o, β</i>	1.5
16	<i>Trichocerca similis</i> (Wierzejski, 1893)	+	+		<i>o, β</i>	1.6
Тип Arthropoda – Членистоногие						
Класс Branchiopoda: надотряд Cladocera – ветвистоусые ракообразные						
17	<i>Bosmina (Eubosmina) coregoni</i> Baird, 1857	+	+	+	<i>o</i>	1.2
18	<i>Chydorus sphaericus</i> (Müller, 1785)	+	+	+	<i>o, β</i>	1.8
19	<i>Daphnia (Daphnia) cucullata</i> Sars, 1862	+	+	+	<i>o, β</i>	1.7
20	<i>Daphnia (Daphnia) cristata</i> Sars, 1862		+		<i>o</i>	1.1
21	<i>Daphnia (Daphnia) galeata</i> Sars, 1863		+		<i>o</i>	1.0
22	<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Liévin, 1848)	+	+		<i>o, β</i>	1.6
23	<i>Diaphanosoma mongolianum</i> Uéno, 1938		+	+	н/д	н/д
Класс Copepoda - веслоногие ракообразные						
24	<i>Eudiaptomus graciloides</i> (Lilljeborg, 1888)	+	+	+	<i>o, β</i>	1.7
25	<i>Cyclops strenuus</i> Fischer, 1851		+	+	<i>β, α</i>	2.2
26	<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus, 1857)		+	+	<i>β</i>	1.7
27	<i>Thermocyclops crassus</i> (Fischer, 1853)	+			<i>o</i>	1.3
Всего видов – 27, в том числе по станциям:		19	16	12		

верном участке в качестве доминантов выступают коловратки (69%), что обусловлено присутствием в их составе крупноразмерного вида *Asplanchna priodonta*. Особенно высокая плотность коловраток, до 300 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 12.3 г/м<sup>3</sup> (64% и 82%, соответственно, от общей численности и биомассы зоопланктона) наблюдается на глубине 5 м. Здесь

же отмечается наиболее высокое видовое разнообразие планктонного сообщества, представленного 15 видами (в пробе), и максимальными значениями индекса Шеннона – 3.18 бит.

В августе отмечен количественный рост зоопланктона, в поверхностных слоях озера его численность достигает 156–191 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомас-

Таблица 5. Основные показатели структуры зоопланктона в оз. Архьерейское  
Table 5. Main indicators of zooplankton in Arkhiereiskoe Lake

Показатели Indicators	2.07.24, 4.07.24						15.08.24		
	ст. 1		ст. 2			ст. 3	ст. 1	ст. 2	ст. 3
Глубина, м Depth, m	0.5 м	5 м	0.5 м	7 м	15 м	0.5 м	0.5 м		
Численность, тыс. экз/м <sup>3</sup> Abundance, th. sp./m <sup>3</sup>	79.5	469.50	134.2	61.4	33.2	74.1	191.3	155.7	180.1
Биомасса, г/м <sup>3</sup> Biomass, g/m <sup>3</sup>	1.12	14.88	0.27	0.82	0.71	0.28	0.74	2.23	1.68
Плотность видов в пробе Species density in a sample	10	15	6	6	7	8	14	10	9
Индекс видового разнообразия, $H_N$ Species diversity index, $H_N$	1.67	3.18	1.05	0.87	1.75	1.48	1.85	2.31	1.88
Индекс сапробности, $S$ Saprobic index, $S$	1.54	1.64	1.90	1.63	1.64	1.88	1.50	1.54	1.55

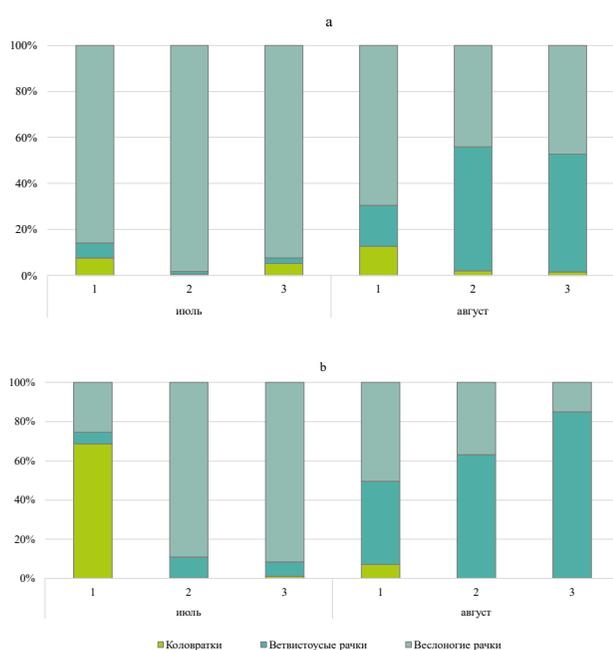


Рис. 4. Вклад отдельных групп беспозвоночных животных в общую численность (а) и биомассу (б) зоопланктона в поверхностном слое оз. Архьерейское; 1–3 – номера станций  
Fig. 4. Contribution of separate groups into total abundance (a) and biomass (b) of zooplankton in surface of Arkhiereiskoe Lake; 1–3 – station numbers

са – 0.74–2.23 г/м<sup>3</sup>. В северной части озера продолжает сохраняться доминирование веслоногих рачков, тогда как массового развития коловраток *A. priodonta* здесь уже не наблюдается. На остальной акватории озера ведущая роль в численности и биомассе переходит, преимущественно, к ветвистоусым рачкам.

Изменения в структуре зоопланктона центральной части озера, наблюдаемые с увеличением глубины, затрагивают, главным образом, его количественное развитие (табл. 5). Происходит заметное снижение численности, тогда как общая биомасса увеличивается. Ведущее значение веслоногих рачков, отмечаемое для поверхностных слоев, сохраняется. При этом относительный рост биомассы на глубинах 7 и 15 м объясняется возрастанием доли взрослых особей ракообразных.

Кластерный анализ степени сходства видового состава зоопланктона по количественному индексу Сьёренсена показывает разделение проб на уровне 15% на 2 основных кластера (рис. 5). Первый образует зоопланктон акватории северного участка озера, второй – из центрального и южного участков. Внутри второго кластера отдельно группируются пробы из поверхностного и глубинных горизонтов, и также отдельно – пробы, отобранные в июле и августе.

Биологическая индикация состояния экосистемы озера Архьерейское. Видовое разнообразие планктонных сообществ озера на основе данных, имеющихся для срединных акваторий северного, центрального и южного участков озера, можно оценивать как невысокого – среднего уровня. Значения индекса видового разнообразия Шеннона изменяются в диапазоне 1.49–2.41 бит для фитопланктона и 1.05–2.31 бит для зоопланктона, и выходят за эти пределы (менее 1 или более 3) лишь в глубоководных слоях водной толщи. Более высокими значениями индекса Шеннона ( $H_N=2.08$ , в среднем) и индекса Пиелу ( $E=0.71$ ,

Таблица 6. Трофические условия (тип) в акватории оз. Архиерейское по прозрачности, содержанию общего фосфора и индексу трофности: М – мезотрофный, О – олиготрофный  
 Table 6. Trophic conditions (type) in Arkhiereiskoe Lake by transparency, total phosphorus content and trophic index: М – mesotrophic, О – oligotrophic

Участок озера Lake area	Прозрачность воды, м Transparency, m			Общий фосфор, мкг/л Total phosphorus, mkg/l		Индекс трофности Trophic index		
	июль July	август August	тип type	май – август May – August	тип type	июль July	август August	тип type
Северный	2.1	1.9	М	32	М	43	54	М
Центральный	3.0	3.5	М	21	М	39	35	О
Южный	> 2.2	> 2.7	М	33	М	36	32	О

в среднем) разнообразие фитопланктона характеризуется в июле, тогда как во второй половине лета оно снижается до 1.70 и 0.55, соответственно, что обусловлено усилением доминирования в планктоне представителей цианопрокариот. Число видов в планктонных пробах варьирует от 9 и до 27 (фитопланктон) и от 6 до 15 (зоопланктон). Относительно более высокими значениями данного показателя выделяются фитопланктон (до 27 видов в пробе) и зоопланктон (14–15) в северной части озера.

Индекс сапробности, рассчитанный по обилию организмов-биоиндикаторов, варьирует в незначительных пределах как для фитопланктона ( $S$  1.7–2.3), так и для зоопланктона ( $S$  1.5–1.9). Эти значения укладываются в диапазон, свойственный для  $\beta$ -мезосапробной зоны, что характеризует уровень органического загрязнения как поверхностных, так и глубоководных горизонтов вод акватории оз. Архиерейского, как зону умеренно-загрязненных вод. В целом, на незначительный уровень органического загрязнения указывают и результаты химико-аналитических измерений воды: значения показателей ХПК и БПК<sub>5</sub> в поверхностных слоях находятся, главным образом, в пределах нормативных значений. По

имеющимся архивным данным (Совершенство ..., 1997), качество вод оз. Архиерейское в конце 1990-х годов на основе сапробиологического анализа фито- и зоопланктонных сообществ открытой акватории также оценивалось как «умеренно загрязненные» воды, в литоральной зоне – как «чистые».

Озеро Архиерейское характеризуется слабым количественным развитием фитопланктона с биомассой, обычно не превышающей 1 мг/л. В целом, незначительное загрязнение и низкое обилие фитопланктона и зоопланктона способствуют довольно высокой прозрачности воды, достигающей на большей части акватории озера 3–3.5 м. Прозрачность воды и содержание общего фосфора являются наиболее доступными методами приближенной оценки трофического состояния водоемов. По этим показателям, используя имеющиеся классификации трофности водных экосистем (Милиус, Кывасик, 1979; Китаев, 1984), условия в озере могут быть охарактеризованы как мезотрофные (табл. 6).

Использование для оценки трофического статуса озера биотических показателей позволяет дифференцировать акваторию озера на зоны с отличающимися условиями трофности. Согласно индексу трофности, который находится в диапазоне значений от 32 до 54, акватория южного и центрального участков озера относится к зоне с олиготрофными условиями, тогда как на северном участке уровень поднимается до мезотрофных.

Отклонение условий в этой части озера по ряду показателей обусловлено, по-видимому, значительным влиянием со стороны частных домовладений с. Тарлаши. Повышенная антропогенная нагрузка на экосистему данного

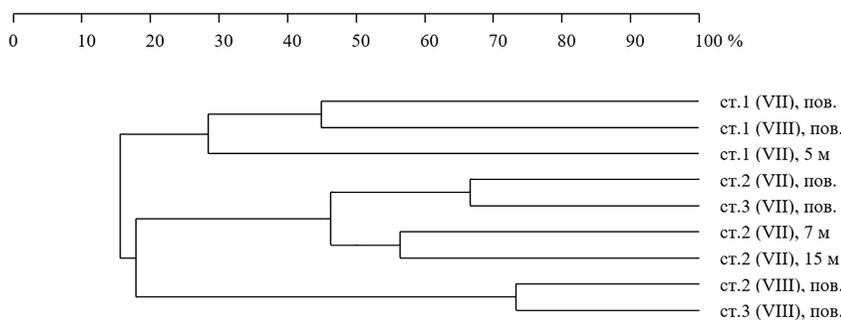


Рис. 5. Дендрограмма сходства исследованных станций по численности видов зоопланктона в оз. Архиерейское  
 Fig. 5. Dendrogram of stations similarity by abundance of zooplankton species in Arkhiereiskoe Lake

участка озера проявляется в нарушении режима водоохранной зоны озера и хозяйственно-бытовом загрязнении вод. Росту уровня трофности в северной части также способствует его довольно изолированное положение и, вследствие этого, затрудненный водообмен с центральной частью озера. Как следствие, в северной части процессы эвтрофирования идут более ускоренными темпами. Так, в развитии гидробиологических сообществ в отдельные периоды (август) отмечается более существенный рост фитопланктона до 2.5 мг/л, на порядок превышающий значения на других участках акватории. При этом в структуре общей численности усиливается доминирование цианопрокариот до 97%, что, по мнению некоторых авторов (Neverova-Dziopak, 2007), позволяет классифицировать условия как эвтрофные. На повышение уровня органического загрязнения в северной части указывает рост БПК<sub>5</sub> как в поверхностных, так и в глубинных слоях, а также заметное снижение прозрачности воды.

### Заключение

Полученные в ходе исследований результаты гидрохимических и гидробиологических исследований указывают на то, что экосистема озера Архиерейское находится в относительно благополучном и устойчивом состоянии. Видовое разнообразие планктонных сообществ открытой акватории озера находится на уровне невысоких – средних значений; качество воды оценивается как «умеренно-загрязненные воды»; трофический статус водоема соответствует олиго-мезотрофным условиям. Вместе с тем, анализ пространственной динамики указывает на имеющееся разделение акватории озера не только по морфометрическим, но и по гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим параметрам. Повышение уровня органического загрязнения и трофности в северной части озера указывает на то, что здесь процесс эвтрофирования носит более выраженный характер, проявляющийся, в том числе, в изменении структуры планктонных сообществ. Обусловлено это, в значительной степени, влиянием жилой застройки в водоохранной зоне озера (с. Тарлаши) и поступающих в водоем вместе с диффузным стоком хозяйственно-бытовых загрязнений. Начатая в последние годы реализация проектов по малоэтажному (коттеджному) строительству на территориях западного и восточного берегов озера должна учитывать данный опыт и при планировании строительных работ следовать положениям о строгом соблюдении режима водоохранной зоны озер.

### Список литературы

1. Алейкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1953. 296 с.
2. Андреев В.Л. Классификационные построения в экологии и систематике. М.: Наука, 1980. 142 с.
3. Барнинова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Био-разнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
4. Водные объекты Республики Татарстан. Гидрографический справочник. Казань: Изд-во «Фолиант», 2018. 512 с.
5. Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан. Казань: Идел-Пресс, 2007. 407 с.
6. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Динамика морфометрических показателей особо охраняемых озер Лаишевского района Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2017. №1. С. 38–43.
7. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. М.: Наука. 1984. 208 с.
8. Макрушин А.В. Биологический анализ качества вод / Под ред. Г.Г. Винберга. Л.: Зоол. ин-т АН СССР, 1974. 60 с.
9. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Под ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовского. М.: Наука., 1975. 240 с.
10. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Ред. Винберг Г.Г., Лаврентьева Г.М. Л.: ГосНИОРХ, 1982. 34 с.
11. Неверова-Дзиopak Е., Цветкова Л.И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб: СПбГАСУ, 2020. 176 с.
12. Неудахина М.А., Анисимова О.В. История изучения рода *Staurastrum* (Zygnematomophyceae, Desmidiaceae) в Московской области // Бюллетень Московского общества испытателей природы. 2022. Т. 127, вып. 2. С. 23–36.
13. Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.
14. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.
15. Определитель пресноводных водорослей СССР Вып. 2. Синезеленые водоросли. М., 1953. 651 с. Вып. 3. Золотистые водоросли. М., 1954. 188 с. Вып. 4. Диатомовые водоросли. М., 1951. 619 с. Вып. 7. Эвгленовые водоросли. М., 1955. 281 с. Вып. 8. Зеленые водоросли. Класс Вольвоксовые. М.; Л., 1959. 230 с. Вып. 11 (2). Зеленые водоросли. Класс Конъюгаты. Порядок Десмидиевые. Л., 1982. 624 с.
16. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
17. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 №552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»
18. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
19. Совершенствование сети ООПТ и создание эколого-обеспечивающего каркаса Республики Татарстан (Западный ПТК Предкамья РТ). Отчет по Договору №41-НИР/97/21 от 8.07.1997 г. В 2-х т. Казань, 1997. Т. 1. 343 с. Т. 2. 277 с. (Архив ИПЭН АН РТ).
20. Справочник по гидрохимии / Под ред. А.М. Никанорова. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 392 с.
21. Фитопланктон Нижней Волги. Водохранилища и низовые реки. СПб.: Наука, 2003. 232 с.
22. Царенко П.М. Краткий определитель хлорококковых

водорослей Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.

23. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: Изд-во ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

24. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Berlin-Heidelberg: Spectrum Academischer Verlag, 1998. Bd. 19/1. 548 p.

25. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 2. Teil: Oscillatoriales // Süßwasserflora von Mitteleuropa. München: Elsevier GmbH, 2005. Bd. 19/2. 759 p.

26. Komárek J. Cyanoprokaryota 3. Teil: Heterocytous Genera // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. Bd. 19/3. 1130 p.

27. Neverova-Dziopak E. Ekologiczne aspekty ochrony wod powierzchniowych. Rzeszow. 2007. 103 p.

28. Wegl R. Index für die Limnosaprobität // Wasser und Abwasser. 1983. Bd. 26. S. 1–175.

## References

1. Alekin O.A. Osnovy` gidrohimii [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1953. 296 p.

2. Andreev V.L. Klassifikatsionny`e postroeniia v e`kologii i sistematike [Classification constructions in ecology and systematics]. Moscow: Nauka, 1980. 142 p.

3. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. Bioraznoobrazie vodoroslei`-indikatorov okruzhaiushchei` sredy` [Biodiversity of environmental indicator algae]. Tel-Aviv: Pilies Studio, 2006. 498 p.

4. Vodny`e ob`ekty` Respubliki Tatarstan. Gidrograficheskii` spravochnik [Water bodies of the Republic of Tatarstan. Hydrographic reference book]. Kazan: Foliant, 2018. 512 p.

5. Gosudarstvenny`i` reestr osobo okhraniaemy`kh prirodny`kh territorii` v Respublike Tatarstan [State Register of Specially Protected Natural Territories in the Republic of Tatarstan]. Kazan, 2007. 407 p.

6. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R. Dinamika morfometricheskikh pokazatelei` osobo okhraniaemy`kh ozer Laishevskogo raiona Respubliki Tatarstan [Dynamics of morphometric parameters of protected lakes located in Laishevo district of the Republic of Tatarstan] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2017. No 1. P. 38–43.

7. Kitaev S.P. E`kologicheskie osnovy` bioproduktivnosti ozer razlichny`kh prirodny`kh zon [Ecological bases of bioproductivity of lakes of different natural zones]. Moscow: Nauka, 1984. 208 p.

8. Makrushin A.V. Biologicheskii` analiz kachestva vod [Biological analysis of water quality] / ed. G.G. Vinberg. Leningrad: Zool. in-t AN SSSR, 1974. 60 p.

9. Metodika izucheniia biogeocenzov vnutrennikh vodomov [Methods of studying biogeocenoses of inland water bodies] / ed. F.D. Morduhai-Boltovskoi. Moscow: Nauka, 1975. 240 p.

10. Metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke materialov pri gidrobiologicheskikh issledovaniiah na presnovodny`kh vodoemakh. Zooplankton i ego produktitsiia [Methodological recommendations on collection and processing of materials for hydrobiological research in freshwater bodies. Zooplankton and its production] / ed. Vinberg G.G., Lavrent`eva G.M. Leningrad, 1982. 34 p.

11. Neverova-Dziopak E., Tsvetkova L.I. Ocenka troficheskogo sostoiianiia poverkhnostnykh vod [Assessment of trophic state of surface waters: a monograph]. Saint Petersburg, 2020. 176 p.

12. Neudakhina M.A., Anissimova O.V. Istoriia izucheniia roda Staurastrum (Zygnematophyceae, Desmidiaceae) v Moskovskoi` oblasti [History of study of genus Staurastrum (Zygnematophyceae, Desmidiaceae) in Moscow region] // Byulleten' Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody. Otdel Biologicheskii [Bulletin of the Moscow Society of Nature Researchers. Department of Biology.]. 2022. Vol. 127, No 2. P. 23–36.

13. Ozyora Srednego Povolzhia [Lakes of the Middle Volga region]. Leningrad: Nauka, 1976. 236 p.

14. Opredelitel zooplanktona i zoobentosa presny`kh vod Evropei`skoi` Rossii. Vol. 1. Zooplankton [Identification keys of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Volume 1. Zooplankton] / ed. Alekseev V.R., Tsalolikhin S.Ya. Moscow: Tovarishestvo nauchny`kh izdaniy` KMK, 2010. 495 p.

15. Opredelitel` presnovodny`kh vodoroslei SSSR. Vyp. 2. Sinezeleny`e vodorosli [Key to Freshwater Algae of the USSR. Vol. 2. Blue-green Algae]. Moscow, 1953. 651 p. Vyp. 3. Zolotisty`e vodorosli [Iss. 3. Golden algae]. Moscow, 1954. 188 p. Vyp. 4. Diatomovy`e vodorosli [Iss. 4. Diatom algae]. Moscow, 1951. 619 p. Vyp. 7. Evglenovy`e vodorosli [Iss. 7. Euglenoid algae]. Moscow, 1955. 281 p. Vyp. 8. Zelenye vodorosli. Class Volvoksovye [Iss. 8. Green algae. Class Volvocales]. Moscow, Leningrad, 1959. 230 p. Vyp. 11 (2). Zeleny`e vodorosli. Class Koniugaty. Poriadok Desmidievye [Iss. 11 (2). Green algae. Class Conjugatophyceae. Order Desmidiales]. Leningrad, 1982. 624 p.

16. SanPin 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy` i trebovaniia k obespecheniiu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlia cheloveka faktorov sredy` obitaniia [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans].

17. Prikaz Minsel`hoza Rossii ot 13.12.2016 №552 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody` vodny`kh ob`ektov ry`bohoziai`stvennogo znachenii, v tom chisle normativov predel`no dopustimy`kh koncentratsii` vredny`kh veshchestv v vodakh vodny`kh ob`ektov ry`bohoziai`stvennogo znachenii» [Order of the Ministry of Agriculture of Russia No. 552 of 13.12.2016 «On the approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies»].

18. Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostny`kh vod i donny`kh otlozhenii` [Guide to Methods of Hydrobiological Analysis of Surface Waters and Bottom Sediments] / ed. V.A. Abakumov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 239 p.

19. Sovershenstvovanie seti OOPT i sozdanie e`kologobespechivaiushchego karkasa Respubliki Tatarstan (Zapadny`i` PTK Predkam`ia RT) [Improvement of the network of protected areas (PAs) and creation of an environmentally supportive framework of the Republic of Tatarstan (Western PTK of the Cis-Kama region of the Republic of Tatarstan)]. Otchet po Dogovoru №41-NIR/97/21 ot 8.07.1997 g. V 2-kh tomakh / Nauch. ruk. V.A. Boi`ko. Kazan. 1997. V. 1. 343 p. V. 2. 277 p. (library of IPEM TAS).

20. Spravochnik po gidrohimii [Handbook of Hydrochemistry.]. Pod red. A.M. Nikanorova. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 392 p.

21. Fitoplankton Nizhnei` Volgi. Vodokhranilishcha i nizov`e reki [Phytoplankton of the Lower Volga. Reservoirs and the lower reaches of the river]. SPb.: Nauka, 2003. 232 p.

22. Tcareno P.M. Kratkii` opredelitel` khlorokokkovy`kh vodoroslei` Ukrainskoi` SSR [A brief guide to chlorococcal algae of the Ukrainian SSR]. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 p.

23. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Kolichestvennaia gidroekologiya: metody` sistemnoi`

identifikacii [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Tol' iatti: Izd-vo IE`VB RAN, 2003. 463 p.

24. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Berlin-Heidelberg: Spectrum Akademischer Verlag, 1998. Bd. 19/1. 548 p.

25. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota 2. Teil: Oscillatoriales // Süßwasserflora von Mitteleuropa. München: Elsevier GmbH, 2005. Bd. 19/2. 759 p.

26. Komárek J. Cyanoprokaryota 3. Teil: Heterocytous Genera // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. Bd. 19/3. 1130 p.

27. Neverova-Dziopak E. Ekologiczne aspekty ochrony wod powierzchniowych. Rzeszow. 2007. 103 p.

28. Wegl R. Index für die Limnosaprobität // Wasser und Abwasser. 1983. Bd. 26. S. 1–175.

Tokinova R.P., Abramova K.I., Galiahmetova L.K., Berdnik S.V., Shagidullin R.R.. **Bioindication of Arkhiereiskoe Lake ecosystem condition based on the structure of planktonic communities.**

In 2024, a survey of Arkhiereiskoe Lake (Tatarstan Republic) was conducted to assess its ecological state and potential risks associated with low-rise development of its catchment area. Based on the study of the chemical properties of lake waters, the species composition, and the quantitative structure of phyto- and zooplankton, an assessment was made of the biological diversity, the level of organic pollution, and the trophic status of the lake in various sections of its water area.

*Keywords:* freshwater ecosystems; biodiversity; plankton; bioindication; Arkhiereyskoye Lake.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 02.04.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 16.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 30.04.2025

#### Информация об авторах

Токинова Римма Петровна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Абрамова Ксения Ивановна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: kseniaiv@yandex.ru.

Галиахметова Люция Камилевна, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: lyuciya-mustafina@yandex.ru.

Бердник Сергей Владимирович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: svberdnik@mail.ru.

Шагидуллин Рифгат Роальдович, доктор химических наук, член-корреспондент АН РТ, директор, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: shagidullin\_@mail.ru.

#### Information about the authors

Rimma P. Tokinova, Ph.D. in Biology, Head of Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Ksenia I. Abramova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: kseniaiv@yandex.ru.

Lucia K. Galiahmetova, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: lyuciya-mustafina@yandex.ru.

Sergey V. Berdnik, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: svberdnik@mail.ru.

Rifgat R. Shagidullin, D.Sci. in Chemistry, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: Shagidullin\_@mail.ru.



*С.Е. Беднарук, В.В. Чуканов, А.В. Мاستрюкова, Н.Н. Чернобровкин*

*Институт водных проблем РАН, sebed@vodinfo.ru*

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ И ДЕЛЬТЫ Р. ВОЛГИ КАК ИНСТРУМЕНТА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НИЖНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Математическое моделирование уровней и расходов воды в водоемах и водотоках Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги является важнейшей задачей, решение которой позволяет более эффективно управлять режимами Нижневолжских водохранилищ, прежде всего, в период осуществления ежегодного специального весеннего попуска. Существующие в настоящее время математические модели не в полной мере отвечают требованиям к быстродействию и точности, необходимым для оперативного планирования режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада. В статье дано описание программной реализации разрабатываемой математической модели Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги, производительность и точность которой позволит использовать её в оперативном режиме. В создаваемой модели водная система представляется ориентированным ациклическим графом произвольной формы, где узлы представляют пойменные водоемы (озера, пруды и др.), а дуги – соединяющие их водотоки (протоки, ерики). Для расчета характеристик узлов и дуг разработаны алгоритмы обработки данных дистанционного зондирования Земли. Для хранения характеристик создана серверная база данных. В статье приведено описание алгоритмов как модели в целом, так и её отдельных блоков. Описаны задачи, которые планируется решать с использованием разрабатываемой модели.

*Ключевые слова:* уровень воды; водоем; водоток; Волго-Ахтубинская пойма; дельта реки Волги; специальный весенний попуск; математическая модель; Волжско-Камский каскад.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.51.58>

### Введение

В условиях незавершенности создания Волжско-Камского каскада водохранилищ задача расчета режимов уровней и расходов в водных объектах Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги на протяжении десятилетий остается актуальной. Как правило, основное внимание при этом уделяется планированию специального весеннего попуска, осуществляемого ежегодно в интересах рыбного и сельского хозяйства Нижней Волги через гидроузел Волгоградского водохранилища. В последние годы в связи с падением уровня Каспийского моря также становятся актуальными расчеты водного режима дельты Волги в меженный период.

В связи со значительной протяженностью и сложной гидравлической сетью р. Волги ниже Волгоградского водохранилища расчеты уровней и расходов воды целесообразно осуществлять с помощью математических моделей.

Первые из действующих математических моделей Нижней Волги работали по принципу «черного ящика», использующего интеграл Дюамеля (Кучмент, 1965; Кучмент, 1972).

Примером программной реализации такой модели является «Диалоговая информационно-советующая система по планированию режимов работы Волжско-Камского каскада водохранилищ», созданная в 1991 г. во ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова. Программа позволяла рассчитывать на основе графика попуска из Волгоградского водохранилища уровни и расходы воды в створах Каменный Яр, Черный Яр, Енотаевка, Верхне-Лебяжье, Астрахань. При этом имелась возможность учесть работу Нижневолжского вододелителя.

Известно несколько математических моделей Нижней Волги, основанных на решении системы уравнений Сен-Венана в одномерной постановке. Такие модели позволяют достаточно детально учитывать русловую сеть и получать результаты расчетов в произвольных точках этой сети. Например, модель, разработанная специалистами ИВП РАН (Болгов и др., 2009) на базе программного комплекса SOBEK, включает все основные рукава и протоки, ширина которых «ориентировочно превышает 20–25 м». Модель дельты р. Волги, созданная в программном

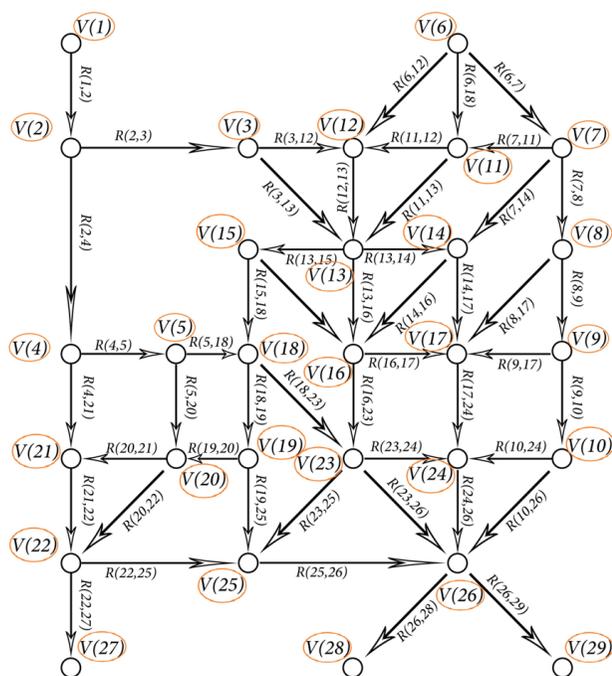


Рис. 1. Пример ациклического ориентированного графа  $G(V,R)$ , представляющего моделируемую систему

Fig. 1. An example of an acyclic directed graph  $G(V,R)$  representing simulated system

комплексе Mike11 (Бубер и др., 2017), включает рукава Бузан, Прямая Болда, Царев, Камызяк, Каньча, Бахтемир, ерик Хурдун, Хурдун, Большая Кара, Бакланенок, Ямная, Старая Волга.

Авторами данной статьи для обоснования режима ппуска воды через Волгоградский гидроузел была разработана модель Нижней Волги с использованием программного комплекса NEC-RAS (Bednaruk et al., 2019). Модель включала р. Волгу от Волгоградского гидроузла до с. Оля в западной части дельты, р. Ахтубу и восточную часть дельты от рукава Бузан до п. Зеленга. Для учета естественного регулирования стока на Нижней Волге были заданы пойменные емкости, описываемые кривыми связи объема и уровня воды  $W=f(H)$ . Гидравлическая связь пойменных емкостей с руслами рек описывалась уравнением водослива с широким порогом.

Более сложный учет движения воды по пойменным водоемам был реализован в одномерно-двумерной модели, созданной в программном комплексе FLOOD (Беликов и др., 2023), где система русел Волги, Ахтубы и основных рукавов дельты ниже бровок представлена одномерной моделью, а выше бровок пойма и дельта описываются в двумерной постановке. По свидетельству авторов модели она «показала хорошую точность расчетов при

различных сбросных расходах Волжской ГЭС и применялась для оценки затопления дельты при разных уровнях Каспийского моря».

При всех достоинствах перечисленных моделей, они не всегда соответствуют требованиям к точности и производительности, предъявляемым в практике оперативного управления Нижневожскими водохранилищами. Например, модель, описанная в статье (Болгов и др., 2009), дает в створе Верхнее Лебяжье расхождение на пике половодья до 3 м относительно измеренных уровней воды. При этом даже если максимальные уровни воды по основным створам на главном русле Волги рассчитываются с удовлетворительной точностью, расчетный ход уровней воды на подъеме и, особенно, на спаде весеннего ппуска заметно отличается от фактического хода уровней воды, так как не учитывается в полной мере аккумуляция и потери стока в многочисленных пойменных озерах и ериках. Использование двумерных моделей ограничено существенными затратами времени на расчеты.

#### Материалы и методы исследования

Для преодоления перечисленных проблем было начато создание детальной быстродействующей математической модели Нижней Волги и её дельты, предназначенной для использования при планировании и осуществлении режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада.

В разрабатываемой модели водная система представляется ориентированным ациклическим графом произвольной формы, где узлы представляют пойменные водоемы (озера, ерики и др.), а дуги – соединяющие их водотоки (рис. 1). Одним из типов узлов может быть «гидроузел», который характеризуется возможностью регулирования потока воды с помощью входящих в его состав гидротехнических сооружений (каждое из которых имеет свою пропускную способность) на основании заданных правил управления (диспетчерских графиков). Главное условие расчета – точное соблюдение во всех узлах моделируемой системы и на каждом расчетном интервале времени баланса водных потоков.

#### Результаты и их обсуждение

С целью автоматизации расчета характеристик Волго-Ахтубинской поймы, необходимых для разрабатываемой модели, был разработан ряд алгоритмов (Беднарук, 2022), использующих в качестве основы цифровую модель рельефа (ЦМР) с плановым разрешением 30 м, полученную по

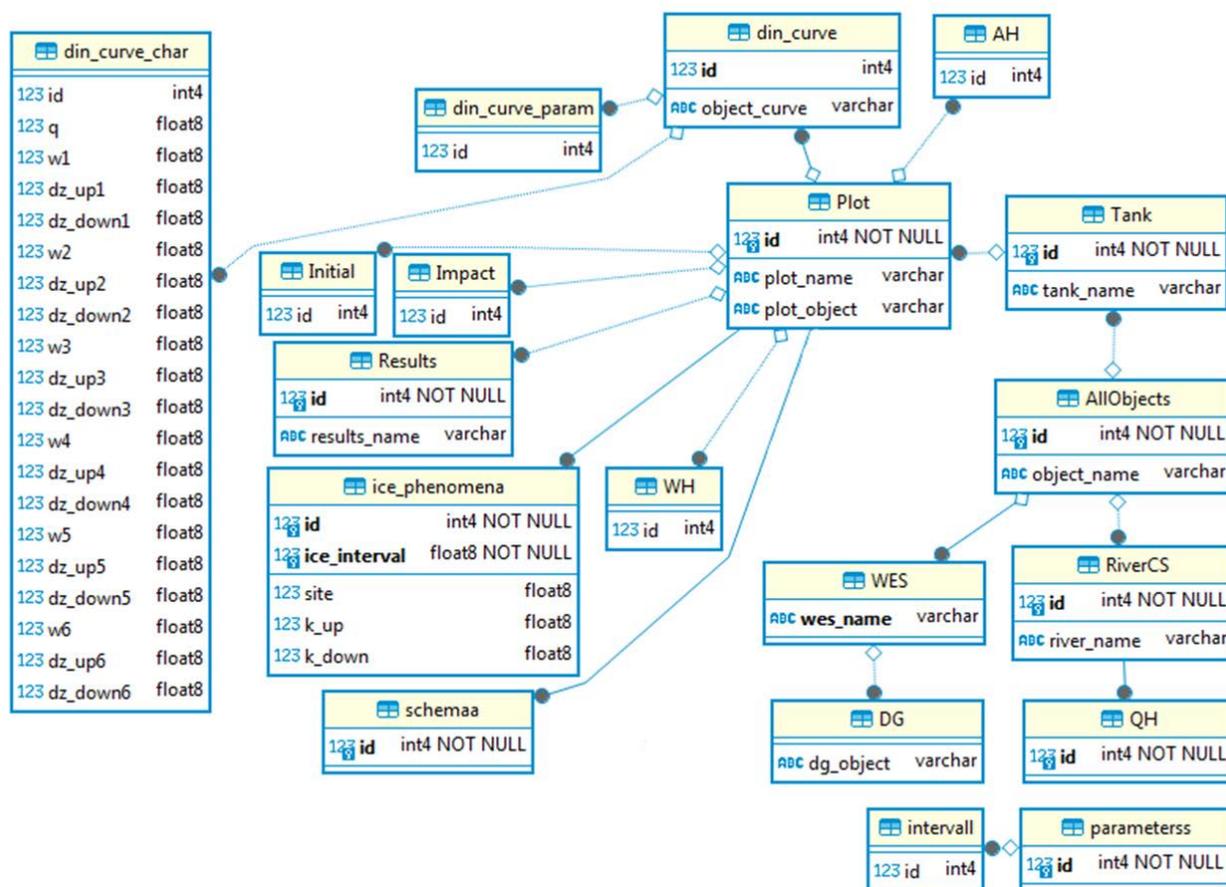


Рис. 2. Схема базы данных, разработанной для хранения характеристик модели Волго-Ахтубинской поймы

Fig. 2. Database scheme for storing characteristics of Volga-Akhutba floodplain model

данным радарной съемки SRTM (Rabus et al., 2006).

Для хранения характеристик математической модели была разработана реляционная база данных (БД) с архитектурой клиент/сервер, состав которой сформирован в соответствии со структурой модели (рис. 2). Для хранения основных характеристик узлов модели предназначены таблицы RiverCS (речной створ), WES (гидроузел) и Tank (водоем). Для хранения основной информации о дугах используется таблица Plot. Имеется также ряд вспомогательных таблиц, содержащих дополнительные параметры узлов и дуг, таблицы, связанные с параметрами расчетов, а также таблица для представления результатов расчетов. Текущая реализация БД выполнена в программном комплексе PostgreSQL v. 17.2.

Порядок реализации расчетного алгоритма разработанной модели и организации проведения расчетов по временным рядам произвольной длительности представлен на блок-схеме на рисунке 3. Алгоритм включает блоки ввода

исходной информации, ее обработки и подготовки данных, организации циклов расчетов по временным интервалам и по расчетным участкам (водоемам (узлам), водотокам (дугам)), вывода результатов расчетов. На рисунке 3 выделены две основные части блок-схемы. Первая описывает получение для каждого расчетного интервала времени траекторий возможного решения для каждого расчетного элемента моделируемой системы – прямая прогонка. Вторая часть описывает получение для каждого расчетного интервала времени окончательного решения для каждого расчетного элемента моделируемой системы – обратная прогонка. Сопряжение прямой и обратной прогонок осуществляется через процедуру определения расходов в нижних граничных дугах или узлах (на блок-схеме обозначена как DBSQ).

Состояние каждого узла модели описывается отметками уровня воды в нем  $Z_i$ , основными воздействиями на узел согласно схеме на рис. 4 являются: приток сверху – расходы воды по входящим водотокам  $q_{i, \dots, i}$ ; боковой приток воды  $q_i$ ; осадки

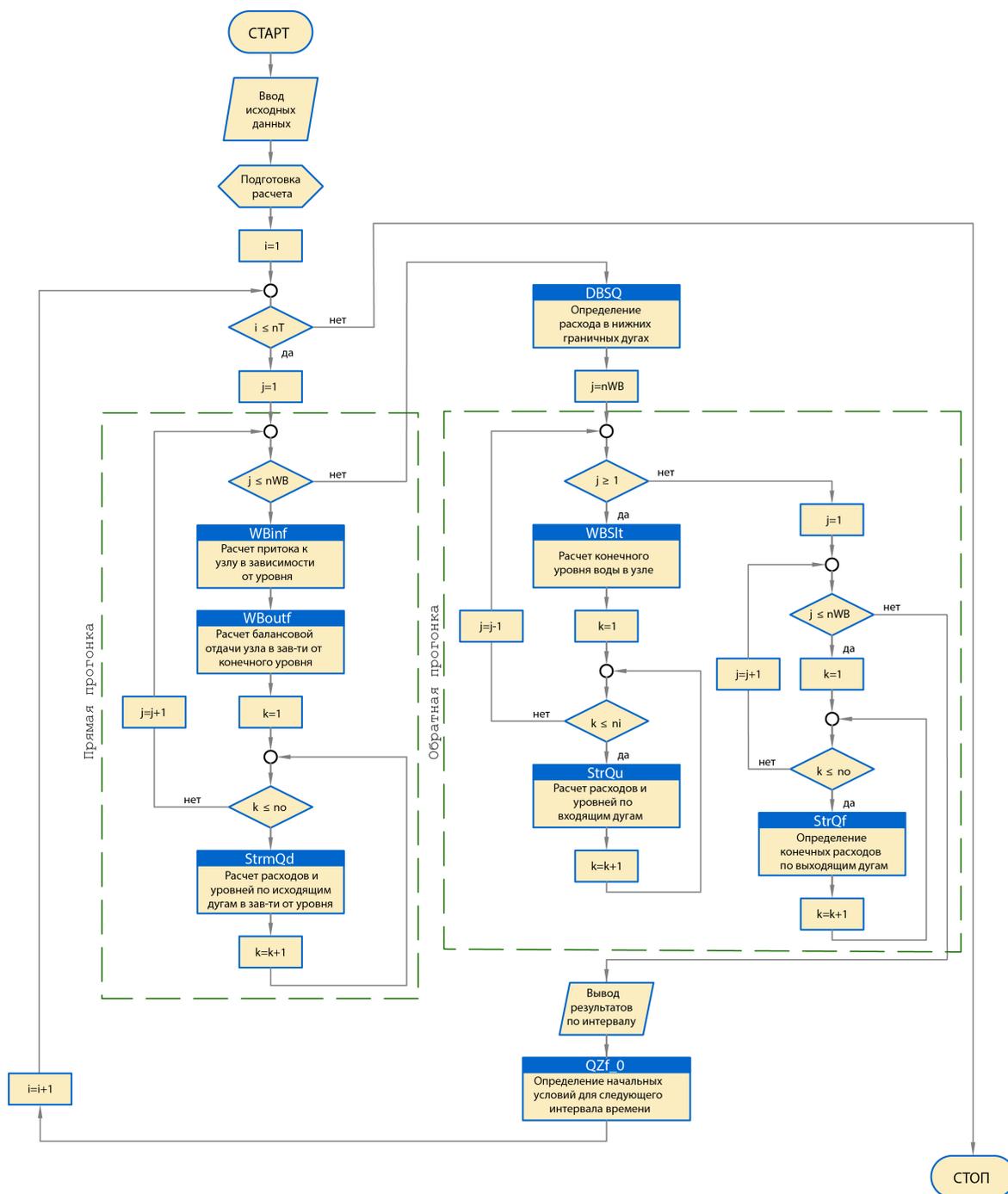


Рис. 3. Блок-схема программной реализации расчетного алгоритма  
Fig. 3. Block diagram of the computational algorithm software implementation

на зеркало водоема  $P$ ; испарение с водной поверхности  $E$ ; отток из узла – расходы воды по выходящим водотокам  $q_{i, i+1}$ . Кроме того, могут быть учтены воздействия, не приведенные на схеме, такие как перепады давления между смежными узлами и сила ветра по направлениям сопрягающих водотоков (дуг).

На каждом расчетном интервале времени для каждого водоема (узла) последовательно сверху вниз при прямой прогонке, по морфометрическим характеристикам водоема, его начальному состоянию и внешним воздействиям определяется

зависимость возможной суммарной балансовой отдачи (оттока воды) в зависимости от расчетного уровня воды в нем на конец расчетного интервала. Получаемая функция (траектория)  $Q=f(Z_i)$ , по сути, представляет собой решение уравнения неразрывности (балансового уравнения).

Решение уравнения движения представляется гидравлической характеристикой выходящих водотоков (корректируемой на каждом расчетном временном интервале по таким внешним воздействиям как перепады атмосферного давления и сила ветра), представленной

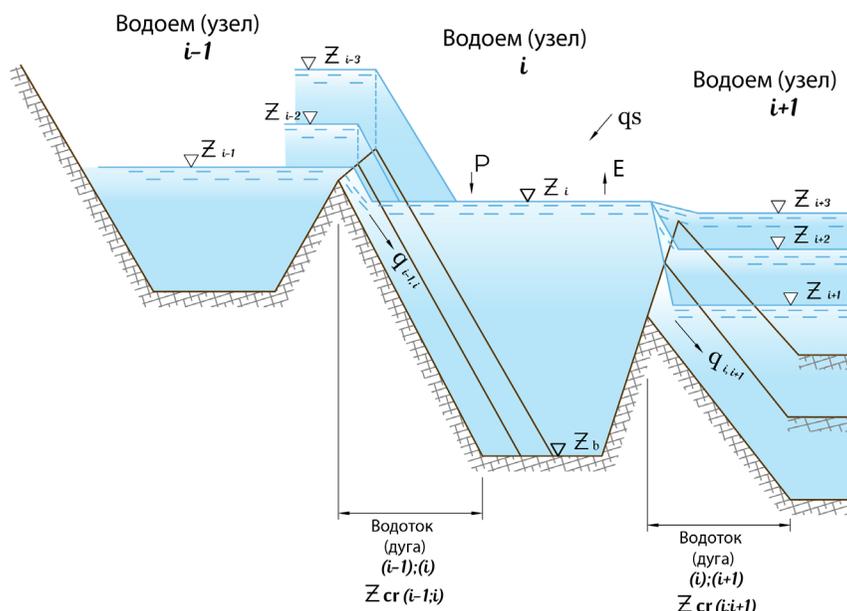


Рис. 4. Расчетная схема сопряжения водоемов (узлов) водотоками (дугами) в моделируемой водной системе

Fig. 4. Computational scheme for connecting water bodies (nodes) with channels (arcs) in the simulated water system

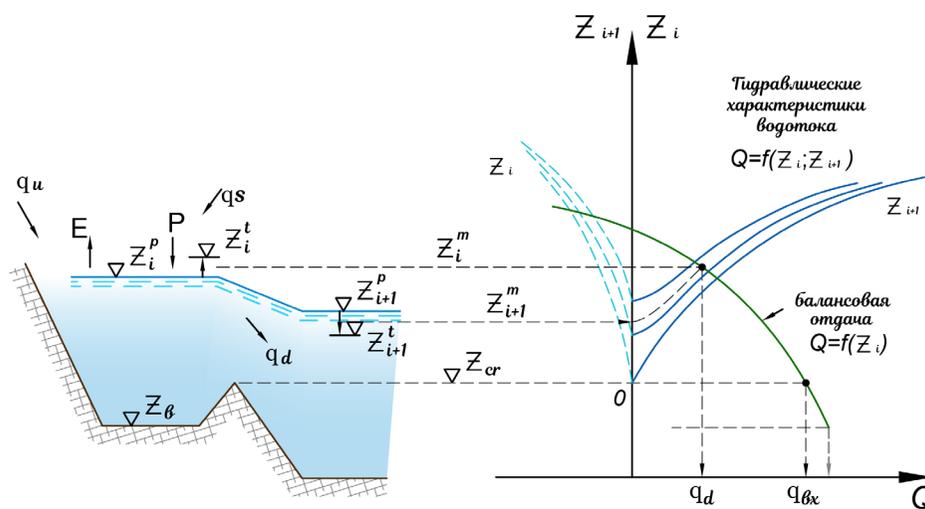


Рис. 5. Расчетная схема определения среднего расхода воды по выходящему водотоку (дуге) на расчетном временном интервале  $\Delta t$

Fig. 5. Computational scheme for determining the average water flow along the outgoing channel (arc) at the time interval  $\Delta t$

номограммой пропускной способности водотока, связывающей расходы воды в нем с уровнями воды сопрягаемых водоемов (узлов)  $Q=f(Z_i; Z_{i+1} \dots)$ .

Наложение указанных характеристик позволяет через определенную итерационную процедуру определить некоторое множество допустимых решений для выходящих дуг, которые далее используются для определения входящих воздействий при определении балансовой отдачи нижерасположенных водоемов (узлов), при их наличии, либо для получения решения, если

нижний створ – граничный.

В общем случае, определение расчетных значений уровней и расходов воды на нижней границе моделируемой системы осуществляется по аналогичной рассмотренной выше схеме в зависимости от вида заданного граничного условия. Возможны следующие варианты задания нижних граничных условий.

а) задание однозначной зависимости расходов от уровней в верхнем створе выходящей граничной дуги  $Q=f(Z_i)$ ;

б) задание уровня воды в нижнем створе

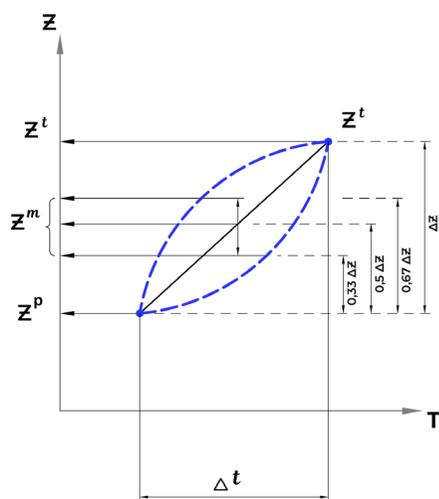


Рис. 6. Расчетная схема переходной функции уровня воды от начального  $Z^p$  до конечного  $Z^t$  для определения среднего  $Z^m$  на расчетном интервале  $\Delta t$

Fig. 6. Computational scheme of the transition function of the water level from the initial  $Z^p$  to the final  $Z^t$  to determine the average  $Z^m$  on the time interval  $\Delta t$

выходящей граничной дуги  $Z_\infty$  и номограммы пропускной способности водотока, связывающей расходы воды в нем с уровнями воды в водоемисточнике и на нижней границе выходящей граничной дуги  $Q=f(Z_i; Z_\infty)$ ;

в) задание на нижней границе выходящей граничной дуги диспетчерского графика работы гидроузла на конец расчетного интервала времени  $Q=f(Z_{\text{то}})$ .

В основном, в расчетах используется среднее на расчетном интервале значение уровня воды

соответствующее линейному его изменению, т.е. при коэффициенте  $k=0.5$  в уравнении определения среднего значения:

$$Z^m = Z^p + k\Delta Z, \text{ где } \Delta Z = Z^t - Z^p.$$

Однако, в ряде случаев, например для обеспечения сходимости решений, получаемых при обратной прогонке в случае нескольких выходящих из узла дуг, используется нелинейная переходная функция. Форма переходной функции может быть до вогнутой или выпуклой параболической (рис. 6), т.е. при коэффициентах  $k$ , изменяющихся в пределах от 0.33 до 0.67. В случае, если в створе имеется шлюз-регулятор, работающий по некоторому диспетчерскому графику, т.е. имеет место ступенчатое изменение расходов воды, значение  $k$  может превышать 0.9.

Для отработки алгоритмов программной реализации модели был подготовлен тестовый участок модели, включающий русло р. Волги, р. Ахтубу, соединяющий их Волго-Ахтубинский канал и несколько пойменных ериков. Всего тестовая модель включает 45 узлов (рис. 7).

### Заключение

В ходе разработки математической модели Волго-Ахтубинской поймы были созданы и протестированы алгоритмы автоматизированного расчета характеристик на основе ЦМР, а также подготовлена база данных для хранения рассчитанных характеристик. В части создания программной реализации модели разработана её блок-схема, а также расчетная схема определения расходов оттока воды из узла.

Разрабатываемую модель предполагается

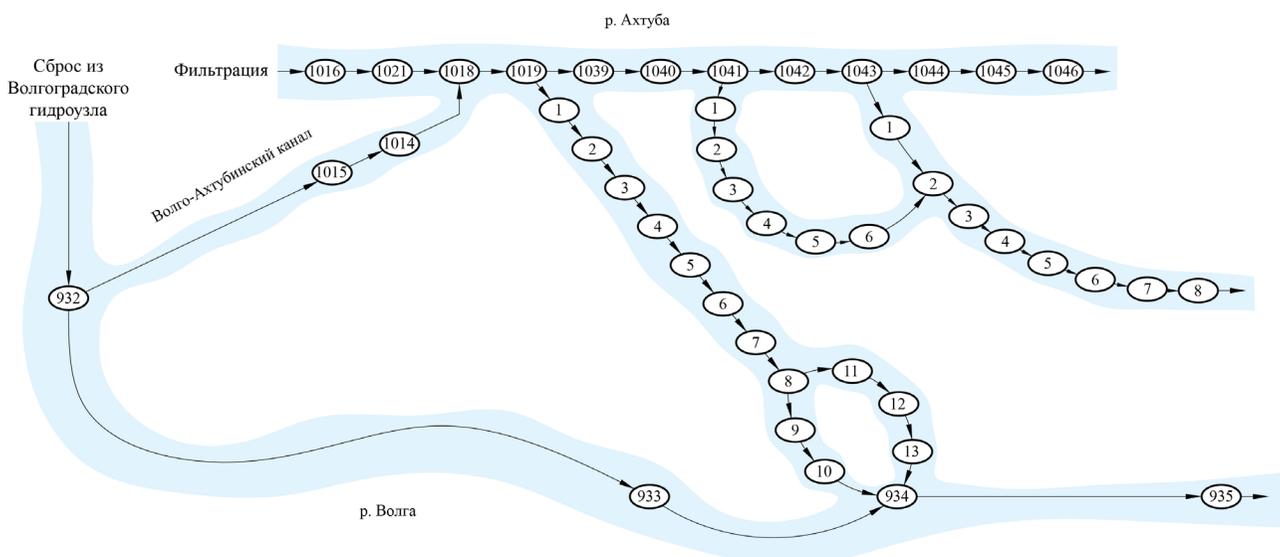


Рис. 7. Схема тестового участка модели Волго-Ахтубинской поймы  
 Fig. 7. Scheme of the test section of Volga-Akhtuba floodplain model

использовать для решения следующих задач.

Ретроспективный анализ осуществленных режимов специальных весенних попусков в низовья Волги через Волгоградский гидроузел и определение возможно более эффективных вариантов соответствующих попусков с учетом реально осуществимых режимов работы гидроузлов каскада.

Разработка и осуществление попусков в низовья Волги при оперативном регулировании режимов работы Нижневолжских водохранилищ.

Моделирование водных режимов водоемов и водотоков Нижней Волги (Волго-Ахтубинской поймы, дельты Волги, Западных Подstepных ильменей) при планировании и проектировании водохозяйственных структурных мероприятий, включая работы по дноуглублению и расчисткам водных объектов.

*Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0003 «Разработка численных моделей гидрологических, гидродинамических и гидрохимических процессов в водных объектах и их водосборных бассейнах, создание на основе разработанных моделей технологий поддержки решений в сфере водной безопасности для информационной модернизации водохозяйственной отрасли России» Государственного задания ИВП РАН.*

### Список литературы

1. Беднарук С.Е., Мاستрюкова А.В., Чуканов В.В. Алгоритмы автоматизации расчета характеристик водных объектов на примере Волго-Ахтубинской поймы // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, №9. С. 1231–1239. doi: 10.22227/1997-0935.2022.9.1231-1239.
2. Беликов В.В., Алексюк А.И., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В. Опыт численного гидродинамического моделирования протяженных участков рек // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, №4. С. 367–384. doi: 10.31857/S032105962304003X.
3. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Шаталова К.Ю. Компьютерное моделирование изменений уровня воды на Нижней Волге // Природообустройство. 2009. №4. С. 68–72.
4. Бубер А.А., Бородычев В.В., Талызов А.А. Разработка гидродинамической модели дельты реки Волги и Западных подstepных ильменей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. №2. С. 271–283.
5. Кучмент Л.С. Линейные модели расчета неустановившегося движения воды в реках // Труды ЦИП. 1965. Вып. 141. С. 21–34.
6. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 191 с.
7. Bednaruk S.E., Dilman N.A., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. Reduction in the numbers of blood-sucking blackflies in Volgograd during the 2018 World Cup as special challenge of integrated water resource management of the cascade reservoir system // Arid Ecosystems. 2019. Vol. 25, №4. P. 92–99. doi: 10.1134/S2079096119040012.
8. Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. The shuttle radar

topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2003. Vol. 57 (4). P. 241–262. doi:10.1016/S0924-2716(02)00124-7.

### References

1. Bednaruk S.E., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. Algoritmy avtomatizacii rascheta harakteristik vodnih ob'ektov na primere Volgo-Ahtubinskoj pojmy [Automation algorithms for water bodies characteristics calculation on the example of the Volga-Akhtuba floodplain] // Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]. 2022. Vol. 17, No 9. P. 1231–1239. doi: 10.22227/1997-0935.2022.9.1231-1239
2. Belikov V.V., Aleksyuk A.I., Borisova N.M., Vasileva E.S., Glotko A.V. Opyt chislenogo gidrodinamicheskogo modelirovaniya protjazhennykh uchastkov rek [Experience of numerical hydrodynamic modeling of extended river sections] // Vodnye resursy [Water resources]. 2023. Vol. 50, No 4. P. 367–384. doi: 10.31857/S032105962304003X.
3. Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Shatalova K.Yu. Komp'yuternoe modelirovanie izmenenij urovnya vody na Nizhnej Volge [Computer modeling of water level changes in the Lower Volga] // Prirodoustrojstvo [Environmental management]. 2009. No 4. P. 68–72.
4. Buber A.A., Borodychev V.V., Talyzov A.A. Razrabotka gidrodinamicheskoy modeli del'ty reki Volgi i Zapadnykh podstepnykh il'meney [Development of the hydrodynamic model of the delta of the river of the Volga and the western steppe illments] // Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Lower Volga agro-university complex: science and higher professional education]. 2017. No 2. P. 271–283.
5. Kuchment L.S. Linejnye modeli rascheta neustanovivshegosya dvizheniya vody v rekakh [Linear models for calculating unsteady water flow in rivers] // Trudy TsIP [Proceeding of Central Institute of Forecasting]. 1965. Iss. 141. P. 21–34.
6. Kuchment L.S. Matematicheskoe modelirovanie rechnogo stoka [Mathematical modeling of river flow]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 191 p.
7. Bednaruk S.E., Dilman N.A., Mastryukova A.V., Chukanov V.V. Reduction in the numbers of blood-sucking blackflies in Volgograd during the 2018 World Cup as special challenge of integrated water resource management of the cascade reservoir system // Arid Ecosystems. 2019. Vol. 25, No 4. P. 92–99. doi: 10.1134/S2079096119040012.
8. Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2003. Vol. 57 (4). P. 241–262. doi:10.1016/S0924-2716(02)00124-7.

**Bednaruk S.E., Chukanov V.V., Mastryukova A.V., Chernobrovkin N.N. Development of the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga river delta mathematical model as a tool for improving of the Lower Volga reservoirs management.**

Mathematical modeling of water levels in pools and watercourses of the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga River delta is considered as one of the most important task in improving the efficiency of Lower Volga reservoirs management, especial-

ly during annual special spring water releases. The mathematical models developed to date do not fully meet the requirements for speed and accuracy necessary for operational planning of the Volga-Kama Cascade reservoirs operation modes. The software implementation of the developed mathematical model of the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga River delta is described. Its anticipated performance and accuracy will allow it been used in operational mode. In the model being created, the water system is represented by a directed free shape acyclic graph, where the nodes represent floodplain water bodies (lakes, pools, etc.), and the arcs are the streams connecting them (rivulets, «erics», etc.). Algorithms for processing Earth remote sensing data have been developed to calculate the characteristics of nodes and arcs. A server database has been created to store the characteristics. The paper describes the algorithms of the model. The tasks that are planned to be solved using the developed model are described.

*Keywords:* water level, pools, watercourses, Volga-Akhtuba floodplain; Volga-River delta; special spring water release; mathematical model; Volga-Kama cascade.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### **Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 13.03.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 25.03.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 08.04.2025

#### **Информация об авторах**

Беднарук Сергей Евстафьевич, инженер, Институт водных проблем РАН, 119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, 3, E-mail: sebed@vodinfo.ru.

Чуканов Виталий Викторович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, 119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, 3, E-mail: 4yk@vodinfo.ru.

Мастрюкова Алина Валерьевна, инженер, Институт водных проблем РАН, 119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, 3, E-mail: alina@bk.ru.

Чернобровкин Никита Николаевич, инженер, Институт водных проблем РАН, 119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, 3, E-mail: kitchrkit@gmail.com.

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

Sergey E. Bednaruk, Engineer, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, 3, Gubkin st., Moscow, 119333, Russia, E-mail: sebed@vodinfo.ru.

Vitaliy V. Chukanov, PhD in Technology, Researcher, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, 3, Gubkin st., Moscow, 119333, Russia, E-mail: 4yk@vodinfo.ru.

Alina V. Mastryukova, Engineer, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, 3, Gubkin st., Moscow, 119333, Russia, E-mail: alina@bk.ru.

Nikita N. Chernobrovkin, Engineer, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, 3, Gubkin st., Moscow, 119333, Russia, E-mail: kitchrkit@gmail.com.



В.С. Валиев, Д.В. Иванов, Р.Р. Хасанов

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, podrost@mail.ru

## ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ КАЧЕСТВА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК И ЗНАЧЕНИЙ СУММАРНОГО ГОДОВОГО СЛОЯ ОСАДКОВ

Проблема моделирования качества поверхностных вод малых рек является актуальной как в контексте прогнозирования динамики его изменчивости во времени, так и при оценках критических показателей загрязненности. В статье рассматривается взаимосвязь между суммарным количеством осадков, выпадающих на водосборе, и качеством вод рек Казанка, Свяига и Меша (Республика Татарстан). Установлено, что наибольший вклад в общую картину изменчивости качества речных вод вносят критические показатели загрязненности: БПК<sub>5</sub>, нитриты, сульфаты, железо, фенолы, медь и марганец. Атмосферные осадки оказывают существенное влияние на формирование качества речных вод в теплый период года (апрель – октябрь), определяя рост вклада критических показателей загрязненности в величину УКИЗВ.

*Ключевые слова:* качество поверхностных вод; малые реки; осадки; УКИЗВ; критические показатели загрязненности.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.59.65>

### Введение

Развитие общества сопровождается ускорением урбанизации природной среды, укрупнением промышленного и сельскохозяйственного производства, активным вовлечением в него всё больших объемов природных вод, что приводит к ухудшению их качества и формированию устойчивого загрязнения. В этих условиях возникает необходимость оценки качества вод в динамике, при одновременном обобщении значений совокупности гидрохимических показателей и факторов, оказывающих влияние на их изменчивость. Актуальной задачей становится выявление ключевых факторов, формирующих нелинейную динамику качества, то есть определяющих изменения тренда обобщающих или агрегирующих содержания в природных водах множества загрязняющих веществ.

Известно, что в различных геохимических провинциях, а также в разных климатических условиях формируются разные природные гидрохимические составы вод (Янин и др., 2012), однако оценка влияния этих факторов на изменчивость качества вод во времени практически не учитывается при анализе многолетних данных гидрохимического мониторинга. Вместе с тем, изучению вклада осадков в показатели речного стока, установлению соотношения между элементами, составляющими водный баланс водосборных территорий, посвящены многочисленные исследования (Евстигнеев и др., 1999; Борзенко-

ва, Лемешко, 2005; Розенберг, 2009). Их характерной особенностью является выявление характера изменчивости этих элементов в многолетней динамике, поиск определенных закономерностей в изменении структуры водного баланса отдельных бассейнов. Установлена тесная связь между максимально возможным испарением и суммой средних суточных положительных температур воздуха (Ясинский, 2013), хорошо изучены и описаны различные способы и алгоритмы расчета расхода воды в речных системах в зависимости от количества выпавших осадков (Наумов, Ахмедова, 2023; Miró et al., 2022; Golian et al., 2021).

З.К. Иофиним (2015) описана линейно-корреляционная модель водного баланса, которая оперирует значениями потерь, на величину которых отличаются значения речного стока от значений атмосферных осадков, выпадающих на водосбор. Им отмечается, что в уравнении водного баланса для многолетнего периода, предложенном М.А. Великановым (Великанов, 1948), имеется неопределенность, значительно искажающая результат:

$$P = Y + E + U \pm d$$

где P – слой атмосферных осадков, выпадающих на водосбор, мм; Y – слой речного стока, мм; U – слой инфильтрации в подземные воды, мм; d – слой водообмена между соседними бассейнами подземным путем.

Так как инфильтрация U и водообмен d не могут быть практически определены, то эти параметры учитываются в лучшем случае в виде попра-

вочных коэффициентов, а сами расчеты проводятся по трем переменным: атмосферные осадки, речной сток и суммарное испарение. То есть слой осадков и величина потерь на испарение являются основными показателями, используемыми при оценке водотоков в пределах одного бассейна.

Поэтому особый интерес представляют осадки, формирующие снежный покров и выпавшие в условиях отрицательных температур, то есть при значениях испарения и инфильтрации, которыми можно пренебречь. Есть исследования, непосредственно указывающие на то, что слой осадков в холодный период года является более точным и информативным при построении расчетных моделей стока малых рек (Галахов и др., 2020). Отмечено, что значения водозаписа, накопленного в снежном покрове, являются более значимым прогнозным показателем речного стока малых рек, чем суммарный годовой слой осадков.

Задача определения обобщающего показателя для системы мониторинга качества поверхностных вод была решена в РД 52.24.643–2002, где представлен алгоритм расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды, включающего, помимо определения кратности превышения ПДК, определение повторяемости случаев превышения порога, а также учитывающего вклад отдельных показателей в итоговый уровень загрязненности природных поверхностных вод (Черногаева и др., 2023).

Динамика изменчивости гидрологических характеристик оказывает непосредственное влияние на формирование гидрохимического режи-

ма реки за счет различной степени разбавления концентраций и за счет различного массопереноса веществ поверхностным стоком. При этом расход воды в реке сильно зависит от количества атмосферных осадков. В этой связи было выдвинуто предположение, что существует взаимосвязь между суммарным слоем осадков и качеством поверхностных вод, формирующихся на водосборе, количественная оценка которой и составило цель данного исследования.

### Материалы и методы исследования

С целью проверки возможной взаимосвязи между качеством поверхностных вод и показателями выпадения осадков был собран обширный материал, включающий значения различных гидрохимических показателей вод трех малых рек, протекающих по территории Республики Татарстан: Свияги, Казанки и Меши (рис. 1), полученные в результате многолетнего (2014–2024) ежемесячного отбора проб на всей их протяженности, а также информацию о суммарных количествах осадков, выпавших на регион за указанный период. В исследовании использованы данные гидрохимического мониторинга, осуществляемого Министерством экологии и природных ресурсов Республики Татарстан, а также собственные фондовые материалы.

В качестве показателя, интегрально описывающего качество речных вод, использовался удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), рассчитанный по РД 52.24.643–2002 отдельно для каждого года исследования по 15

показателям обязательного перечня: аммоний, БПК<sub>5</sub>, железо общее, кислород, марганец, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, сульфаты, фенолы, хлориды, ХПК, цинк. В качестве порогов использовались значения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения. Расчет УКИЗВ осуществлялся по наблюдениям в месяцы теплого периода, охватывающего внутригодовой промежуток с апреля по октябрь включительно, при этом оценивались как отдельные водные объекты (Казанка, Меша и Свияга), так и совокупность всех наблюдений. Для расчета УКИЗВ

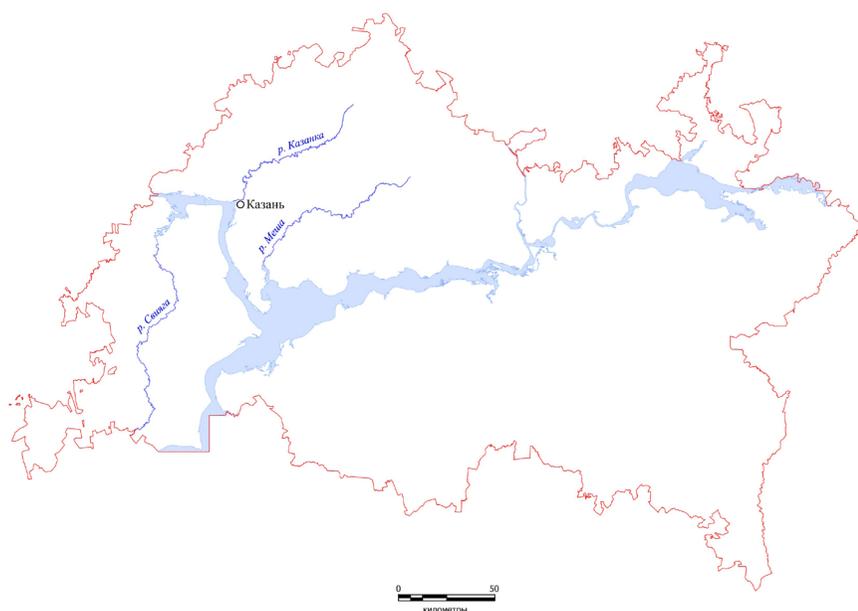


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых рек  
Fig. 1. Map-scheme of the location of the rivers under study

использовались только те результаты гидрохимического анализа, в которых присутствовали все рассматриваемые показатели и их значения были больше 0, при этом учитывались критические показатели загрязненности (КПЗ). В итоге для проведения расчетов был сформирован массив данных, включающий результаты гидрохимического анализа 420 проб воды р. Казанки, 102 проб р. Мешы и 211 проб р. Свияги.

Суммарное количество осадков оценивалось по метеостанции «Казань» (55.7400 с.ш., 49.2042 в.д.) по базе данных метеосводок Всемирной метеорологической организации и официальным данным Росгидрометецентра (<http://www.pogodaiklimat.ru/>; <https://climate-energy.ru/weather/spravochnik/>). Данные по осадкам делились на две группы: суммарный годовой слой осадков (мм) за теплый период (апрель – октябрь) и суммарный годовой слой осадков за холодный период (ноябрь – март). Холодный период охватывал промежуток времени, включающий ноябрь и декабрь предыдущего года, а также январь, февраль и март года, для которого оценивалось качество поверхностных вод.

Статистическая обработка данных включала расчеты коэффициента корреляции Спирмена, также осуществлялась сравнительная графическая оценка многолетней изменчивости полученных показателей.

### Результаты и их обсуждение

При оценке результатов исследования отмечено большое сходство изменчивости значений УКИЗВ по годам, рассчитанного для рек, расположенных в разных физико-географических регионах Республики Татарстан: Предкамье (Казанка, Меша) и Предволжье (Свияга) (рис. 2).

Класс загрязненности речных вод в разные годы менялся в зависимости от количества кри-

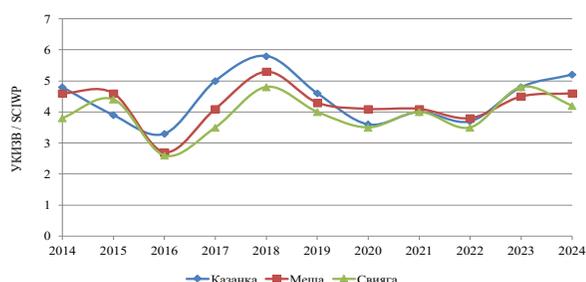


Рис. 2. Многолетняя изменчивость значений УКИЗВ, рассчитанных по 15 гидрохимическим показателям

Fig. 2. Long-term variation of specific combinatorial index values of the of water pollution (SCIWP) calculated by 15 hydrochemical indicators

тических показателей загрязненности: в р. Казанке от «загрязненной 3б» до «очень грязной 4в»; в р. Мёше от «загрязненной 3а» до «очень грязной 4в»; в р. Свияге от «загрязненной 3а» до «очень грязной 4г».

Согласно РД 52.24.643–2002, критическим показателем загрязненности считается такой показатель, обобщенный индекс которого больше или равен 9, то есть, когда наблюдается устойчивая либо характерная загрязненность. Для всех водных объектов исследования критическими показателями загрязненности являлись одни и те же показатели качества вод, но в разных сочетаниях. Так, для р. Свияги в качестве КПЗ отмечались такие показатели как БПК<sub>5</sub>, сульфаты, железо, медь, марганец; для р. Мешы – нитриты, сульфаты, железо, фенолы, марганец; для р. Казанки – все вышеперечисленные показатели вместе. Таким образом, три водных объекта характеризуются однотипным набором из семи основных загрязнителей.

В связи с тем, что для всех рек критическими показателями загрязненности являлись одни и те же гидрохимические показатели, дополнительно был рассчитан УКИЗВ только по этим семи показателям, что позволило получить более полное представление о динамике изменчивости качества речных вод во времени (рис. 3). Сравнение УКИЗВ, рассчитанных разным способом, показало значительно различающийся характер изменчивости величины индекса по годам (рис. 2, 3).

На рисунке 4 представлены значения УКИЗВ, рассчитанные двумя способами по совокупности гидрохимических данных, характеризующих качество вод исследуемых рек (733 пробы). Как видно из рисунка, значения УКИЗВ, рассчитанного по КПЗ (7 показателей), ожидаемо значительно выше стандартного УКИЗВ, рассчитанного по 15 показателям, при этом колебания их значений по годам исследований сильно отличаются друг от друга, что указывает на то, что критические показатели загрязненности представлены в разные годы неодинаково, а их вариативность может быть следствием воздействия внешних факторов, общих для всех рек.

Сходство изменчивости качества вод исследуемых рек, характеризующихся различными физико-географическими условиями, формирующими их водный режим, предполагает наличие внешних, общих для них факторов, схожим образом детерминирующих гидрохимический состав водных масс. В числе такого рода факторов следует рассматривать характер антропогенной нагрузки на их бассейны, а также климатические и гидрологические особенности формирования речного

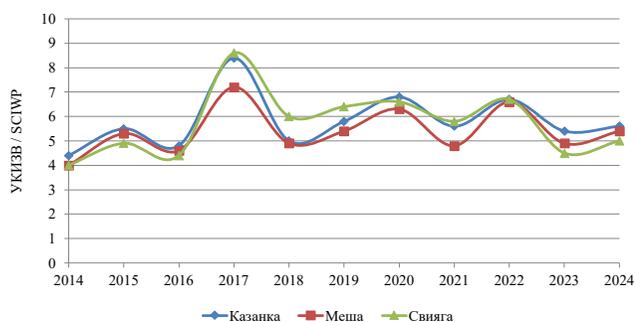


Рис. 3. Многолетняя изменчивость значений УКИЗВ, рассчитанных по критическим показателям загрязненности  
 Fig. 3. Long-term variability of the specific combinatorial index values of water pollution (SCIWP) calculated by critical pollution indicators

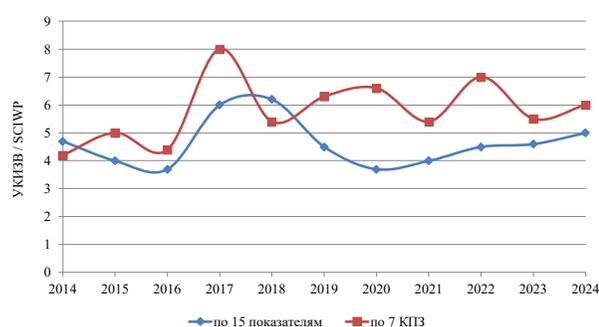


Рис. 4. Многолетняя изменчивость значений УКИЗВ по всей совокупности наблюдений  
 Fig. 4. Long-term variability of the specific combinatorial index values of water pollution (SCIWP) calculated for the entire set of observations

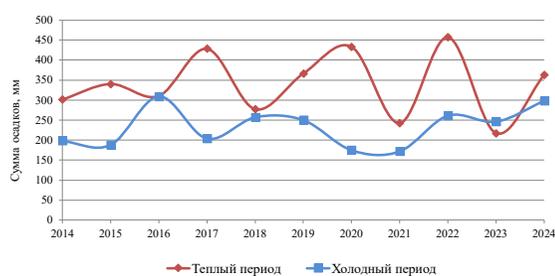


Рис. 5. Сопряженная динамика изменчивости количества осадков за теплый период года и значений УКИЗВ по КПЗ  
 Fig. 5. Conjugate dynamics of variability of precipitation amount during the warm period of the year and the specific combinatorial index values of water pollution (SCIWP) calculated by critical pollution indicators

стока. Большая часть площади бассейнов Казанки, Мешы и Свияги (до 80%) представляет собой сельскохозяйственные ландшафты с различной долей лесистости, что, несомненно, оказывает влияние на формирование стока биогенных эле-

ментов. При этом в их бассейнах отсутствуют крупные населенные пункты и промышленные предприятия, которые могли бы существенно влиять на качество воды. Поэтому рабочей гипотезой исследования явилось предположение, что на формирование качества вод исследуемых рек определяющее влияние оказывают локальные климатические факторы, в первую очередь осадки, формирующие диффузный сток загрязняющих веществ.

Проверка данной гипотезы осуществлялась сопоставлением и оценкой корреляционной связи между значениями количества осадков, выпадающих в теплый и холодный периоды, по метеостанции «Казань», расположенной в 100-км зоне, охватывающей все точки отбора гидрохимических проб, и значениями УКИЗВ. Имеющийся набор данных был разбит на две выборки: первая отражает взаимосвязь количества осадков в различные годы со значениями УКИЗВ, рассчитанными по 15 гидрохимическим показателям, вторая выборка – эту же взаимосвязь, но со значениями УКИЗВ, рассчитанными по критическим показателям загрязненности (7 показателей) (табл. 1).

Отмечена высокая взаимосвязь между количеством осадков в течение теплого периода года (апрель – октябрь) и значениями удельного комбинаторного индекса, рассчитанного по критическим показателям загрязненности вод за тот же период (рис. 5, табл. 2). При этом с количеством осадков, выпавших в течение холодного периода, а также в течение всего года, статистически значимых взаимосвязей не выявлено ( $p > 0.05$ ) (табл. 2).

Таким образом, зависимость качества поверхностных вод от количества осадков, выпавших на водосборе рек, проявляется только в период положительных среднесуточных температур и только для ряда показателей, которые вносят наибольший вклад в общую картину загрязненности: это лабильные органические вещества (по БПК<sub>5</sub>), нитриты, сульфаты, железо, фенолы, медь и марганец. Вероятно, подобная ситуация обусловлена увеличением диффузного массопереноса указанных веществ с водосборных территорий после выпадения осадков.

### Заключение

В результате проведенного исследования отмечена высокая статистически значимая прямая взаимосвязь между количеством осадков и качеством поверхностных вод рек, оцениваемым по величине удельного комбинаторного индекса загрязненности. Установлена схожая динамика изменчивости значений УКИЗВ рек Казанки,

Таблица 1. Суммы осадков и величины УКИЗВ, рассчитанные по отдельным рекам и по совокупности наблюдений  
 Table 1. Total precipitation and the values of the specific combinatorial index of water pollution (SCIWP) calculated for individual rivers and for a set of observations

Годы Years	Количество осадков, мм Total precipitation, mm			УКИЗВ* SCIWP*			
	Теплый период Warm period	Холодный период Cold period	За год Per year	Казанка Kazanka	Меша Mesha	Свияга Sviyaga	Для всех рек For all rivers
2014	301	198	499	4.8 / 4.4	4.6 / 4.0	3.8 / 4.0	4.7 / 4.2
2015	340	188	528	3.9 / 5.5	4.6 / 5.3	4.4 / 4.9	4.0 / 5.0
2016	310	309	619	3.3 / 4.8	2.7 / 4.6	2.6 / 4.4	3.7 / 4.4
2017	428	204	632	5.0 / 8.4	4.1 / 7.2	3.5 / 8.6	6.0 / 8.0
2018	277	257	534	5.8 / 5.0	5.3 / 4.9	4.8 / 6.0	6.2 / 5.4
2019	366	250	616	4.6 / 5.8	4.3 / 5.4	4.0 / 6.4	4.5 / 6.3
2020	433	175	608	3.6 / 6.8	4.1 / 6.3	3.5 / 6.6	3.7 / 6.6
2021	242	172	414	4.0 / 5.6	4.1 / 4.8	4.0 / 5.8	4.0 / 5.4
2022	457	261	718	3.7 / 6.7	3.8 / 6.6	3.5 / 6.7	4.5 / 7.0
2023	217	246	463	4.8 / 5.4	4.5 / 4.9	4.8 / 4.5	4.6 / 5.5
2024	363	298	661	5.2 / 5.6	4.6 / 5.4	4.2 / 5.0	5.0 / 6.0

\* Перед чертой – по 15 показателям, после черты – по 7 КПЗ.

\* Before the line – by 15 indicators, after the line – by 7 critical pollution indicators.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между суммой осадков и УКИЗВ  
 Table 2. Correlation coefficients between the amount of precipitation and specific combinatorial index of water pollution (SCIWP)

Реки Rivers	Теплый период Warm period	Холодный период Cold period	Сумма осадков за год Annual precipitation
УКИЗВ по 7 КПЗ SCIWP by 7 critical pollution indicators			
Казанка	<b>0.74*</b>	-0.21	0.47
Меша	<b>0.82</b>	0.04	<b>0.66</b>
Свияга	<b>0.69</b>	-0.08	0.50
Все реки	<b>0.70</b>	0.04	0.57
УКИЗВ по 15 показателям SCIWP by 15 indicators			
Казанка	-0.31	0.12	-0.06
Меша	-0.41	-0.09	-0.35
Свияга	-0.59	-0.10	-0.49
Все реки	-0.15	0.25	0.13

\* статистически значимые коэффициенты ( $p < 0.05$ )

\* statistically significant coefficients ( $p < 0.05$ )

Меши и Свияги, рассчитанного за период с 2014 по 2024 годы. Наибольший вклад в изменение качества воды вносят такие критические показатели загрязненности (КПЗ) как БПК<sub>5</sub>, нитриты, сульфаты, железо, фенолы, медь и марганец.

Вероятно, это обусловлено увеличением интенсивности диффузного выноса загрязняющих веществ в реки при соответствующем росте количества осадков, выпадающих на их водосборных территориях. УКИЗВ, рассчитанный только по

значениям критических показателей загрязненности, оказался более значимым для оценки динамики изменчивости качества поверхностных вод и ее взаимосвязи с количеством осадков, чем стандартный УКИЗВ по обязательному перечню из 15 контролируемых веществ. Для всей совокупности наблюдений коэффициент корреляции между значениями УКИЗВ по КПЗ и суммой осадков теплого периода составил 0.70 ( $p=0.017$ ). Вместе с этим, не удалось обнаружить значимых корреляций между качеством поверхностных вод и количеством снеговых осадков, выпавших на водосборах рек в период, предшествующий весеннему паводку. Подтвердилось предположение, что локальные климатические факторы, в частности осадки, могут оказывать существенное влияние на формирование качества поверхностных вод малых рек в теплый период года за счет увеличения доли критических показателей загрязненности.

### Литература

1. Борзенкова И.И., Лемешко Н.А. Водный баланс бассейна Волги в начале XXI века (на основе палеоклиматических сценариев) // *Метеорология и гидрология*. 2005. №7. С. 52–60.
2. Великанов М.А. Гидрология суши. Л.: Гидрометеоздат, 1948. 530 с.
3. Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. Влияние условий формирования снежного покрова на сток половодья горной реки (на примере бассейна реки Ануй) // *Известия АО РГО*. 2020. №1. С. 24–33. doi: 10.24411/2410-1192-2020-15603.
4. Евстигнеев В.М., Акименко Т.А., Евсеева Л.С. Географические закономерности межгодовых колебаний речного стока // *Проблемы гидрологии и гидроэкологии*. М.: Географический факультет МГУ, 1999. Вып. I. С. 95–118.
5. Иофин З.К. Воднобалансовые параметры водосборов рек Северо-Запада (на примере рек Вологодской области) // *Природообустройство*. 2015. №3. С. 82–85.
6. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р. Сравнение способов определения слоя суточных осадков для расчета максимальных расходов дождевых паводков (на примере Калининградской области) // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18, №12. С. 1957–1965. doi: 10.22227/1997-0935.2023.12.1957-1965.
7. РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.
8. Розенберг Г.С. Волжский бассейн на пути к устойчивому развитию. Тольятти: Изд-во Кассандра, 2009. 476 с.
9. Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А. Интегральная оценка качества воды в бассейне Волги по данным мониторинга в XXI в. // *Известия РАН. Сер. Географическая*. 2023. Т. 87, №6. С. 875–884.
10. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2012. №6. С. 3–22.
11. Ясинский С.В. Водный баланс природных зон бассейна р. Волги в разные по водности фазы многолетнего пе-

риода // *Известия РАН. Сер. Географическая*. 2013. №6. С. 86–101.

12. Golian S., Murphy C., Meresa H. Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland // *Journal of hydrology: regional studies*. 2021. Vol. 36. 100859. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100859.
13. Miró J.J., Lemus-Canovas M., Serrano-Notivoli R., Cantos J.O., Estrela M.J., Martin-Vide J., Sarricolea P., Meseguer-Ruiz O. A component-based approximation for trend detection of intense rainfall in the Spanish Mediterranean coast // *Weather and climate extremes*. 2022. Vol. 38. 100513. doi: 10.1016/j.wace.2022.100513.
14. <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 20.03.2025).
15. <https://climate-energy.ru/weather/spravochnik/> (дата обращения: 20.03.2025).

### References

1. Borzenkova I.I., Lemeshko N.A. Vodnyy balans basseyna Volgi v nachale XXI veka (na osnove paleoklimaticheskikh stsenariyev) [Water balance of the Volga basin at the beginning of the 21st century (based on paleoclimatic scenarios)] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 2005. No 7. P. 52–60.
2. Velikanov M.A. Gidrologiya sushy [Hydrology of land]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1948. 530 p.
3. Galakhov V.P., Samoiloova S.Yu., Mardasova E.V. Vliyaniye usloviy formirovaniya snezhnogo pokrova na stok polovod'ya gornoy reki (na primere basseyna reki Anuy) [Influence of snow cover formation conditions on the flood runoff of a mountain river (using the Anuy River basin as an example)] // *Izvestiya AO RGO* [News of the Russian Geographical Society]. 2020. No 1. P. 24–33. doi: 10.24411/2410-1192-2020-15603.
4. Evstigneev V.M., Akimenko T.A., Evseeva L.S. Geograficheskiye zakonomernosti mezhdogovykh kolebaniy rechnogo stoka // [Geographical patterns of interannual fluctuations in river runoff] // *Problemy gidrologii i gidroekologii* [Problems of hydrology and hydroecology]. Moscow: Geographical faculty of Moscow State University, 1999. Iss. I. P. 95–118.
5. Iofin Z.K. Vodnobalansovyye parametry vodosborov rek Severo-Zapada (na primere rek Vologodskoy oblasti) [Water balance parameters of river catchments in the North-West (using the rivers of the Vologda region as an example)] // *Prirodoobustroystvo* [Nature management]. 2015. No 3. P. 82–85.
6. Naumov V.A., Akhmedova N.R. Sravneniye sposobov opredeleniya sloya sutochnykh osadkov dlya rascheta maksimal'nykh raskhodov dozhdevykh pavodkov (na primere Kaliningradskoy oblasti) [Comparison of methods for determining the daily precipitation layer for calculating the maximum discharge of rain floods (using the Kaliningrad region as an example)] // *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU]. 2023. Vol. 18, No 12. P. 1957–1965. doi: 10.22227/1997-0935.2023.12.1957-1965.
7. RD 52.24.643–2002. Metod kompleksnoy otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskimi pokazatelyam [Method for comprehensive assessment of the degree of pollution of surface waters based on hydrochemical indicators].
8. Rosenberg G.S. Volzhskiy basseyn na puti k ustoychivomu razvitiyu [Volga basin on the way to sustainable development]. Tolyatti: Kassandra Publishing House, 2009. 476 p.
9. Chernogaeva G.M., Zhuravleva L.R., Malevanov Yu.A. Integral'naya otsenka kachestva vody v basseyne Volgi po dannym monitoringa v XXI v. [Integral assessment of water quality in the Volga basin based on monitoring data in the 21st century] // *Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya*. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]. 2023.

Vol. 87, No 6. P. 875–884.

10. Yanin E.P., Kuzmich V.N., Ivanitsky O.M. Regional'naya prirodnyaya neodnorodnost' khimicheskogo sostava vod sushi i neobkhodimost' yeye ucheta pri otsenkakh ikh ekologicheskogo sostoyaniya i intensivnosti tekhnogenogo zagryazneniya [Regional natural heterogeneity of the chemical composition of land waters and the need to take it into account when assessing their ecological state and the intensity of technogenic pollution] // Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov [Problems of the environment and natural resources]. 2012. No 6. P. 3–72.

11. Yasinsky S.V. Vodnyy balans prirodnykh zon basseyna r. Volgi v raznyye po vodnosti fazy mnogoletnego perioda [Water balance of natural zones of the Volga River basin in different water content phases of a long-term period] // Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]. 2013. No 6. P. 86–101.

12. Golian S., Murphy C., Meresa H. Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland // Journal of hydrology: regional studies. 2021. Vol. 36. 100859. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100859.

13. Miró J.J., Lemus-Canovas M., Serrano-Notivoli R., Cantos J.O., Estrela M.J., Martin-Vide J., Sarricolea P., Meseguer-Ruiz O. A component-based approximation for trend detection of intense rainfall in the Spanish Mediterranean coast // Weather and climate extremes. 2022. Vol. 38. 100513. doi: 10.1016/j.wace.2022.100513.

14. <http://www.pogodaiklimat.ru/> (accessed: 20.03.2025).

15. <https://climate-energy.ru/weather/spravochnik/> (accessed: 20.03.2025).

### Valiev V.S., Ivanov D.V., Khasanov R.R. **Assessment of the relationship between the rivers water quality and the total annual precipitation.**

The problem of modeling the quality of surface waters in small rivers is relevant both in the context of predicting the dynamics of its variability over time and in assessing critical pollution indicators. The article examines the relationship between the total annual precipitation layer and the quality of surface waters formed in the catchment area of the Kazanka, Sviyaga and Mesha rivers (Republic of Tatarstan). It has been established that the greatest contribution to the overall picture of river water quality variability was made by critical pollution indicators: BOD5, nitrites, sulfates, iron, phenols, copper and manganese. Atmospheric precipitation had a significant impact on the formation of river water quality in the warm period of the year (April – October), determining the growth of the contribution of critical pollution indicators to the value of the specific combinatorial index of water pollution.

**Keywords:** surface water quality; small rivers; precipitation; specific combinatorial index; critical pollution indicators.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### **Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 16.04.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 29.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 13.05.2025

#### **Информация об авторах**

Валиев Всеволод Сергеевич, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: podrost@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, доктор географических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Хасанов Рустам Равилевич, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: rustamkhasanov88@gmail.com.

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

Vsevolod S. Valiev, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: podrost@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, D.Sci. in Geography, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: water-rf@mail.ru.

Rustam R. Khasanov, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya St., Kazan, 420087, Russia, E-mail: rustamkhasanov88@gmail.com.



I.I. Ziganshin<sup>1</sup>, D.V. Ivanov<sup>1</sup>, I.M. Safin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences,  
irek.ziganshin@tatar.ru

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University

## SPATIAL DISTRIBUTION AND HYDROGRAPHIC CHARACTERISTICS ANALYSIS IN DETACHED BAYS OF THE TETYUSHSKY REACH OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

The creation of the Kuibyshev Reservoir led to the formation of numerous bays, a significant portion of which underwent complete or partial isolation from the main water area. That resulted in a new natural-anthropogenic element in coastal landscapes. The aim of this work was to analyze the spatial distribution and morphometric parameters of isolated bays within the water area of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev Reservoir. For the analysis, satellite imagery from Google Earth and Sentinel-2, as well as field research data from 2024, were utilized. Computations were performed in QGIS 3.28.3 GIS for the summer low-water period of 2024 at a normal water level of 52.7 m BS (Baltic System). The study identified 103 detached bays with a total water surface area of 246 hectares. The majority of the bays were located on left-bank islands formed after the flooding of the reservoir bed. Based on water surface area, they were classified as «small water bodies», characterized predominantly by oval and near-circular shapes and slightly indented shorelines. The dynamics of the water surface area showed the trend toward reduction, particularly for bays not connected to the main water area during the flood period. The significance of those findings was underscored by the location of the study objects within the territory of the «Spassky» Biosphere Reserve and the buffer zone of the UNESCO World Heritage Site – historical and archaeological complex of Bolgar.

*Keywords:* detached bays; Kuibyshev Reservoir; geographic information systems; monitoring of water bodies; morphometric indicators.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.66.70>

The Kuibyshev Reservoir is one of the world's largest artificial water bodies, with the surface area of 5900 km<sup>2</sup> at a normal pool level (NPL) of 53 m above sea level (Baltic Height System). Its length is 510 km along the Volga River and 300 km along the Kama River (Kuibyshevskoe ..., 2008). The hydrological regime of the reservoir is characterized by seasonal flow regulation: it fills to NPL in spring, and during the rest of the year, water is drawn down, lowering levels by several meters and fully exposing shallow areas (Bamburov et al., 1991).

As the largest multipurpose reservoir in Russia, it plays a vital role in supporting economic sectors and socio-cultural needs. Its creation caused large-scale environmental changes in both the flooded zone and adjacent territories. One consequence was the formation of numerous bays – parts of the reservoir extending into land while maintaining hydrodynamic connectivity. Most have since become fully or partially isolated, creating new natural-anthropogenic elements of coastal landscapes used for economic and recreational purposes.

State water monitoring requires systematic ob-

servations of morphometric transformations. Thus, studying morphometric parameters of detached bays – a new type of inland surface water body – is a crucial scientific and practical task. This will enable forecasting near- and long-term changes in their ecosystems.

The reservoir comprises lake-like expansions divided into 8 development zones connected by narrow sections of the former riverbed. Data on detached bays, including morphometrics, are limited to the Volzhsky reach (Ziganshin, Ivanov, Khasanov, 2021, 2022; Ziganshin et al., 2024).

This article analyzes the key morphometric characteristics of detached bays in the Tetyushsky reach of the Kuibyshev Reservoir, located in the middle Volga after the confluence of the Volga and Kama rivers near Tetyushi. Its northern boundary is the Kama River mouth, and its southern boundary is just below the Maina River mouth (fig. 1).

The Tetyushsky reach is ~80 km long and 3–20 km wide at its broadest point. Its water surface area is 766 km<sup>2</sup> (~13.2% of the total reservoir area). Most (80%) lies in Tatarstan, with a smaller section (20%)

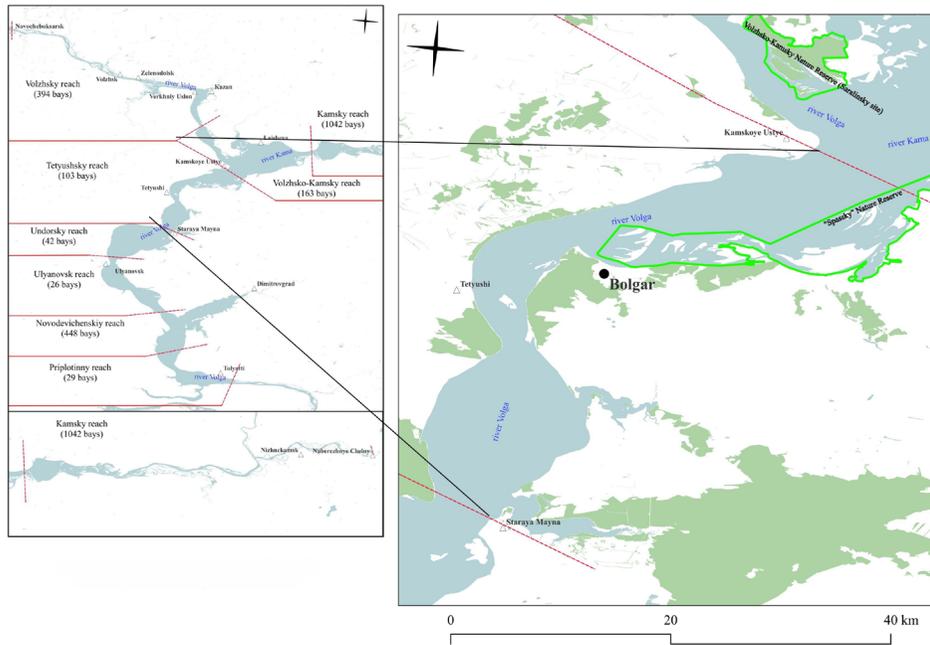


Fig. 1. Location of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev Reservoir

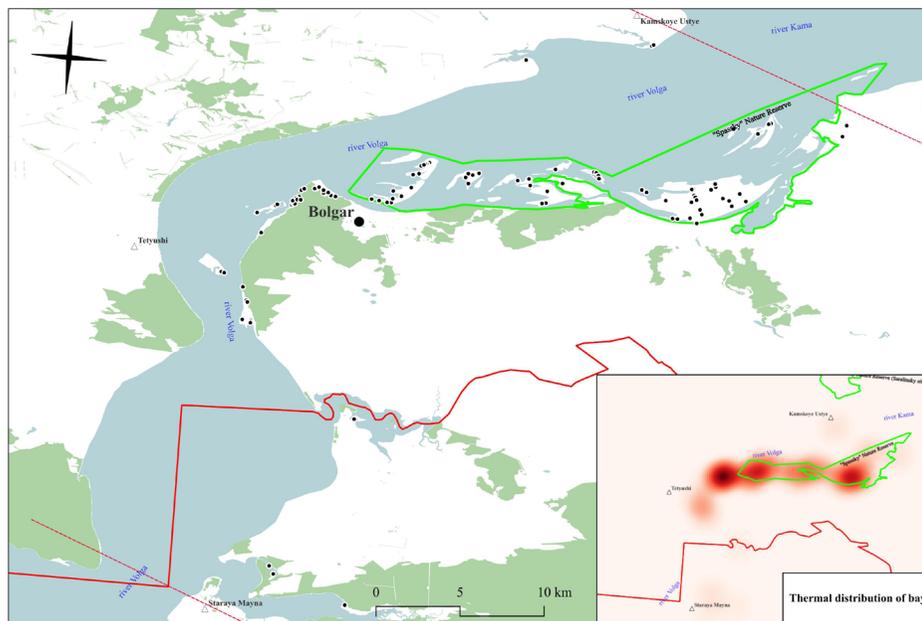


Fig. 2. Spatial distribution of detached bays of the Kuibyshev reservoir in the study area

in Ulyanovsk Oblast. Depths are significant (avg. 10 m), reaching 20 m in navigation channels. Coastal depths are 5–10 m on the right bank and 2–5 m on the left bank. Currents are weak (avg. 0.5 m/sec), especially in bays, promoting siltation. Littoral zones ( $\leq 2$  m depths) cover  $<10\%$  of the area. The bottom is sandy throughout; higher aquatic vegetation occurs only on the left bank. Volga’s banks are asymmetric: the right bank is high (100–150 m), steep, and cliff-like (limestone/clay); the left bank is gentle, flood-prone, and erosion-susceptible.

Data sources included 2024 field surveys, Google Earth and Sentinel-2 satellite imagery. Calculations used QGIS 3.28.3 for the 2024 summer low-water period at poor level 52.7 m (Baltic System). Statistical processing employed Statistica 8.0.

Satellite imagery and field data revealed 103 detached bays (total area 246 ha) in the Tetyushsky reach during summer 2024. Most were on islands formed by reservoir filling along the left Volga bank (fig. 2). Sixty-four water bodies were within the UNESCO World Heritage Site buffer zone — the historical and archae-

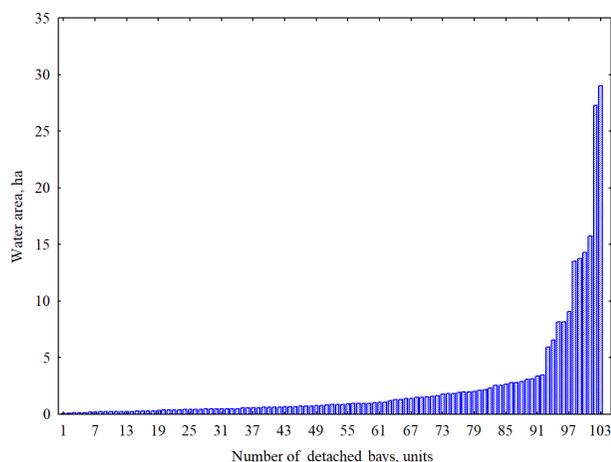


Fig. 3. Histogram of water areas distribution of detached bays in Tetyushsky reach

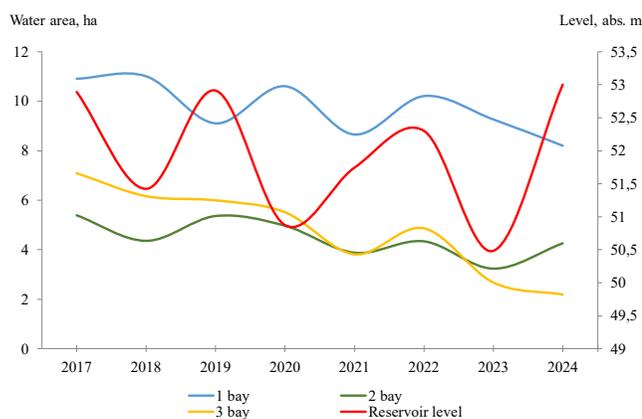


Fig. 4. Water area dynamics of detached bays based on reservoir level and spring flood connectivity (1 bay: periodically flooded; 2 bay: consistently flooded; 3 bay: unflooded)

ological complex of Bolgar and the «Spassky» State Nature Reserve.

The high right Volga bank was less prone to flooding negative landforms. Its hard rocks (limestone, sandstone) resisted erosion, reducing bay formation. Only three detached bays existed there: one formed by flooding the depression where village buildings (Kirelskoe) were demolished during reservoir creation; two others emerged from the separation of straits between islands and the mainland near Kamskoye Ustye.

Unlike the Volzhsky reach (where many bays were artificially isolated), detachment in the Tetyushsky reach occurred naturally. Abrasion-accumulative spits formed at bay inlets – flooded erosional features (hollows, gullies, ravines) or former straits – progressively isolating them from the main reservoir.

By water area (GOST R 59054-2020), those bays were «small water bodies» (<1 ha). Per I.S. Zakhenkov's lake classification (1964), they fell into: small lakes (10–100 ha), tiny lakes (1–10 ha), and

ponds (0.1–1 ha). Most (94%) were in the latter two classes (fig. 3).

Only six water bodies had the water surface area exceeding 10 hectares. Most were located in the water area of Staromainsky Bay (Ulyanovsk oblast).

Water bodies with very shallow maximum depths predominated (tab. 1). The smallest maximum depths (1–2 m) were observed in detached bays situated within island complexes. The greatest depth (7 meters) was recorded in the bay near the village of Volzhskoye in Ulyanovsk oblast.

Changes in the water area of the water bodies were subjected to fluctuations in the reservoir water level, as well as the presence of a hydrological connection with the main water area of the reservoir during the spring flood season. The conducted analysis of water area changes for three model detached bays, each having different hydrodynamic connections with the reservoir's main water area, revealed a general trend of decreasing water surface area regardless of the water level or connection with the Kuibyshev reservoir. At the same time, for water bodies flooded by reservoir waters during spring floods, this trend followed a smoother pattern, and fluctuations in their water area largely depended on the reservoir's water level (fig. 4).

The elongation coefficient (lake length / mean width) in Tetyushsky reach bays varies from 1.4 to 24.9 (avg. 5.3). Unlike the Volzhsky reach (where bays are mostly furrow-shaped), most there trended toward oval/circular forms (tab. 2).

Statistical processing of the data using Spearman's correlation coefficient revealed the weak relationship between the elongation coefficient and the water surface area ( $r=0.26$ ,  $p < 0.05$ ).

Regarding shoreline indentation, the predominant portion of the detached bays in the Tetyushsky reach fell under the category of water bodies with slightly indented shorelines (Table 4). Those values differed significantly from those of the Volzhsky reach, where water bodies with strongly and moderately indented shorelines predominated (Ziganshin et al., 2024).

This study underscores the need for regular monitoring and detailed analysis of detached bays – especially in buffer zones of internationally significant sites – to develop measures ensuring regional ecological resilience.

*The work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, awarded to young PhD holders (postdoctoral researchers) for the purpose of preparing a doctoral dissertation, conducting scientific research, and fulfilling employment duties at scientific and educational institutions of the Republic of Tatarstan under the State Program of the Republic of Tatarstan 'Scientific and Techno-*

Table 1. Morphometric indicators of detached bays in the Tetyushsky reach

Indicator	Mean	Median	Min	Max
Area, ha	2.3	0.8	0.1	29
Length of coastline, m	678	474	113	3770
Length, m	280	198	34	1739
Width, m	103	73	28	608
Average width, m	56	40	12	273
Maximum depth, m	1.9	1.6	0.7	7.0

Table 2. Ranging of detached bays by elongation coefficient

Form	Elongation index	Quantity	% of total
Rounded	< 1.5	1	1
Close to a circle	1.5-3.0	25	24
Close to rounded	3.0-5.0	38	37
Close to oval	5.0-7.0	23	22
Oval-elongated	7.0-10.0	8	8
Elongated in the form of a «furrow»	> 10.0	8	8

Table 3. Distribution of detached bays by shoreline indentation

Indentation degree	Indentation coefficient	Quantity	% of total
Heavily indented	<1.5	99	96
Average Indented	1.5-2	4	4
Weakly indented	> 2	0	0

*logical Development of the Republic of Tatarstan' (Agreement No 98/2024-PD).*

## References

- Bamburov I.S., Vikulov A.I., Vykhristjuk M.M., Seleznev V.A. *Izmenchivost' osnovnyh gidrologicheskikh faktorov pereformirovaniya beregov [Variability of key hydrological factors in shoreline transformation] // Dinamika landshaftov v zone vlijaniya Kujbyshevskogo vodohranilishha [Dynamics of landscapes in the Kuibyshev reservoir zone]. Saint Petersburg: Nauka 1991. P. 6–77*
- GOST R 59054–2020. *Ohrana okruzhajushhej sredy. Poverhnostnye i pozemnyevody. Klassifikacija vodnyh ob'ektov [Environmental protection. Surface and underground water. Classification of water bodies].*
- Zaharenkov I.S. *O limnologicheskoj klassifikacii ozer Belorussii // Biologicheskie osnovy rybnogo hozjajstva na vnutrennih vodoemah Pribaltiki [On the limnological classification of lakes in Belarus] // Trudy X nauchnoi konferencii po vnutrennim vodoemam Pribaltiki [Proceedings of the tenth scientific conference on inland waters of the Baltic states]. Minsk: Nauka i tehnika, 1964. P. 175–176.*
- Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R. *Genezis i morfometricheskaja karakteristika ozer ohrannoj zony Saralinskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Genesis and morphometric characteristics of lakes in the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky reserve] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2021. No 1. P. 36–43. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039*
- Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R. *Osadkonakoplenie v ozerah ohrannoj zony Saralinskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Sedimentation in the lakes of*

the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky reserve] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2021. No 2. P. 47-52.

6. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R. *Dinamika morfometricheskikh parametrov Atabaevskikh ozer Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Dynamics of morphometric parameters of Atabaev lakes in the Volga-Kama Reserve] // Ecology of the native and: problems and ways to solve them / XVI All-russian scientific-practical conference with international participation. Kirov, 2022. P. 85–89.*

7. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Kochetkov D.A. *Genesis and morphometric features of detached bays in the variable backwater zone (Kazan District) of the Kuibyshev Reservoir [Genesis and morphometric specifics of detached bays of the Kazan region of variable backwater of the Kuibyshev reservoir] // Russian journal of applied ecology. 2024. No 4. P. 10–17. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.4.10.17>.*

8. *Kujbyshevskoe vodohranilishche (nauchno-informacionnyj spravochnik) [The Kuybyshev Reservoir (The scientific information manual)]. Tol'yatti, 2008. 123 p.*

## Список литературы

- Бамбуров И.С., Викулов А.И., Выхристюк М.М., Селезнев В.А. *Изменчивость основных гидрологических факторов переформирования берегов // Динамика ландшафтов в зоне влияния Куйбышевского водохранилища. СПб: Наука, 1991. С. 6–77.*
- ГОСТ Р 59054–2020. *Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов.*
- Захаренков И.С. *О лимнологической классификации озер Белоруссии // Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики / Труды X науч.*

конф. по внутренним водоемам Прибалтики. Минск: Наука и техника, 1964. С. 175–176.

4. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №1. С. 36–43. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039.

5. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Осадконакопление в озерах охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №2. С. 47–52. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.3.21.27>.

6. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Динамика морфометрических параметров Атабаевских озер Волжско-Камского заповедника // Экология родного края: проблемы и пути их решения / Материалы XVI Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием. Киров, 2022. С. 85–89.

7. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Кочетков Д.А. Генезис и морфометрические особенности отчлененных заливов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Российский журнал прикладной экологии. 2024. №4. С. 10–17. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.4.10.17>.

8. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.

---

---

**Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Сафин И.М.  
Анализ пространственного распределения и гидрографическая характеристика отчлененных заливов Тетюшского плеса Куйбышевского водохранилища.**

Создание Куйбышевского водохранилища

привело к образованию многочисленных заливов, значительная часть которых подверглась полной или частичной изоляции от основной акватории, сформировав новый природно-антропогенный элемент прибрежных ландшафтов. Целью работы является анализ пространственного размещения и морфометрических параметров отчлененных заливов в акватории Тетюшского плеса Куйбышевского водохранилища. Для анализа использовались спутниковые снимки Google Earth и Sentinel-2, и данные полевых исследований за 2024 г. Вычисления осуществлялись в ГИС QGIS 3.28.3 на летнюю межень 2024 г. при НПУ 52.7 м БС. В ходе исследования выявлено 103 отчлененных залива общей площадью водного зеркала 246 га. Большая часть заливов расположена на левобережных островах, образовавшихся после затопления ложа водохранилища. По площади акватории они относятся к категории «малые водоемы», характеризуются преимущественно овальной и близкой к округлой формой и слабоизрезанными берегами. Динамика площади водного зеркала демонстрирует тенденцию к сокращению, особенно у заливов, не связанных с основной акваторией в период половодья.

*Ключевые слова:* отчлененные заливы; Куйбышевское водохранилище; геоинформационные системы; мониторинг водных объектов; морфометрические показатели.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

**Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 09.04.2025

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 23.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 07.05.2025

**Информация об авторах**

Зиганшин Ирек Ильгизарович, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: irek\_ziganshin@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, доктор географических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-ir@mail.ru.

Сафин Ильдар Марселевич, бакалавр, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: ildar\_marselevich@mail.ru.

**Information about the authors**

Irek I. Ziganshin, Ph.D. in Geography, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: irek\_ziganshin@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, D.Sci. in Geography, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: water-ir@mail.ru.

Safin Ildar Marselevich, Bachelor, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: ildar\_marselevich@mail.ru.



## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

К публикации в «Российском журнале прикладной экологии» принимаются научные статьи, сообщения, рецензии, обзоры по всем разделам экологической науки. В журнале печатаются не публиковавшиеся ранее материалы. В предлагаемых для публикации научных статьях должно содержаться обоснование актуальности, четкая постановка целей и задач исследования, научная аргументация, обобщения и выводы, представляющие интерес своей новизной, научной и практической значимостью.

Для публикации статьи автору (авторам) необходимо представить в редакцию следующие материалы:

- 1) направление от организации (в 1 экз.);
- 2) электронную версию статьи по фамилии первого автора (например, ivanov.doc)
- 3) сведения об авторах: имя, отчество и фамилия, должность, ученая степень и ученое звание, место работы и адрес электронной почты – на русском и английском языках.
- 4) Сканированная копия подписанного Лицензионного договора с каждым автором (форма договора размещена на сайте журнала).

Указанные файлы следует переслать в адрес редакции по электронной почте [rjaeco@mail.ru](mailto:rjaeco@mail.ru) или заполнить непосредственно на сайте журнала [www.rjae.ru](http://www.rjae.ru).

### Требования к тексту рукописи:

Статьи публикуются на русском и английском языке.

Объем рукописи не должен превышать 20 страниц, для рецензий и сообщений – до 5 страниц, для обзоров – до 30 страниц.

Текст статьи должен быть набран в формате MS Word 1997-2003, шрифт Times New Roman, кегль 14, через 1.5 интервала. Поля рукописи 20 мм, абзацный отступ 0.5 см. Текст набирается без переносов.

Текст статьи должен быть разбит на разделы. Рекомендуется использовать стандартные рубрики: «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты и их обсуждение», «Выводы» или «Заключение», «Список литературы».

При оформлении статьи следует соблюдать приведенные ниже правила.

- 1-я строка – УДК (выравнивание по левому краю);
- 2-я строка – инициалы и фамилии автора (авторов), место работы, e-mail (курсив, выравнивание по правому краю);
- 3-я строка – название статьи – на русском и английском языках (прописными буквами, полужирный шрифт, выравнивание по центру);
- 4-я строка – аннотация (не менее 200 слов) и ключевые слова (не более 5, отделяются точкой с запятой) – на русском и английском языках (выравнивание по ширине);
- 5-я строка – текст статьи (выравнивание по ширине).

Заголовки таблиц приводятся курсивом на русском и английском языках. Таблицы могут быть книжной

или альбомной ориентации.

Рисунки к статье должны быть сохранены в отдельных файлах с соответствующим расширением (xls, jpg, tiff). Растровые изображения должны иметь разрешение не менее 300 dpi. Все указанные материалы могут быть представлены в цветном или черно-белом вариантах. Подписи к рисункам приводятся курсивом на русском и английском языках; аббревиатуры расшифровываются в подрисуночных подписях. Все обозначения на рисунках выполняются шрифтом Times New Roman.

Математические формулы должны быть набраны в MS Equation. Пояснения значений символов и числовых коэффициентов необходимо давать непосредственно под формулой в последовательности, в которой они приведены в формуле.

Химические формулы следует набирать с помощью специализированных программ (Chem Draw, HyperChem, Isis Draw). Все элементы химической формулы должны быть хорошо различимы.

Все физические величины должны быть даны в системе единиц «СИ».

В десятичных дробных числах целая часть отделяется от дробной точкой.

Латинские названия видов печатаются курсивом.

Ссылки на литературные источники в тексте даются в круглых скобках, например: (Иванов и др., 2019; Методические ..., 2001; Одум, 2007; Тихомиров, Марков, 2009; Ferrand et al., 2012).

Список литературы составляется в алфавитном порядке и нумеруется в ручном режиме (сначала приводятся отечественные источники, затем иностранные).

Транслитерированный список литературы (References) приводится отдельно. Русскоязычные работы указываются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках приводится их перевод на английский язык. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Обязательным условием является указание в списке литературы DOI (уникальный идентификационный номер цифрового объекта) тех работ, у которых он есть.

### Образец оформления списка литературы:

1. ГОСТ Р ИСО 22033-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений.
2. Григорьян Б.Р., Кольцова Т.Г., Сунгатуллина Л.М., Сахабиев И.А. Оценка соответствия сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан требованиям органического агропроизводства // Российский журнал прикладной экологии. 2016. №3. С. 40–45.
3. Зиганшин И.И., Зиганшина Д.И. Лекарственные растения островов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов / Материалы докл. VII Всерос. научно-практ. конф. Махачкала: Изд-во ДГПУ, 2019. С. 18–20.
4. Иванчева Е.Ю. Сравнительный анализ видовой структуры рыбного населения малых рек Рязанской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2008. 25 с.

5. Сафонов А.Ф. Системы земледелия. М.: Колос, 2006. 447 с.

6. Спирина Е.В. К вопросу о биологии форели ручьевой *Salmo trutta morpha fario* // Природа Симбирского Поволжья. Ульяновск, 2002. Вып. 3. С. 154–157.

7. Яковлев В.А. Изменение структуры зообентоса северо-восточной Фенноскандии под влиянием природных и антропогенных факторов: Дисс. ... докт. биол. наук. Казань, 1999. 436 с.

8. Hanson M.J., Stefan H.G. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // Water Resour. Bull. 1984. V. 20. P. 889–900. doi: 10.1111/j.1752-1688.1984.tb04797.x.

9. WoRMS Editorial Board (2016). World Register of Marine Species // URL: <http://www.marinespecies.org> (дата обращения: 20.05.2016).

#### Образец оформления транслитерированного списка литературы:

1. GOST R ISO 22033-2009. Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Hronicheskaya toksichnost' v otnoshenii vysshih rastenij [Soil quality. Biological methods. Chronic toxicity to higher plants].

2. Grigor'yan B.R., Kol'tsova T.G., Sungatullina L.M., Sakhabiyev I.A. Otsenka sootvetstviya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatij Respubliki Tatarstan trebovaniyam organicheskogo agroproduktstva [Assessment of the conformity of agricultural enterprises of the Republic of Tatarstan with the requirements of organic agricultural production] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2016. No 3. P. 40–45.

3. Ziganshin I.I., Ziganshina D.I. Lekarstvennye rastenija ostrovov kazanskogo rajona peremennogo podpora Kujbyshevskogo vodohranilishha [Medicinal plants of the islands of Kazan area of the variable subpropt of the Kuibyshev reservoir] // Bioraznoobrazie i racional'noe ispol'zovanie prirodnykh resursov [Biodiversity and natural resource

management] / Materialy dokl. VII Vseros. nauchno-prakt. konf. Mahachkala: DGPU, 2019. P. 18–20.

4. Ivancheva E.Yu. Sravnitel'nyj analiz vidovoj struktury rybnogo naseleniya malyh rek Ryazanskoj oblasti [Comparative analysis of the species structure of the fish population of small rivers in the Ryazan region]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) Borok, 2008. 25 p.

5. Safonov A.F. Sistemy zemledeliya [Farming systems]. M.: Kolos, 2006. 447 p.

6. Spirina E.V. K voprosu o biologii foreli ruch'evoy *Salmo trutta morpha fario* [On the biology of brook trout *Salmo trutta morpha fario*] // Priroda Simbirskogo Povolzh'ya [Nature of the Simbirsk Volga]. Ul'yanovsk, 2002. 3. P. 154–157.

7. Yakovlev V.A. Izmenenie struktury zoobentosa severo-vostochnoj Fennoskandii pod vliyaniem prirodnyh i antropogennyh faktorov [Changes in the structure of zoobenthos in northeastern Fennoscandia under the influence of natural and anthropogenic factors]: DSc (Dr. of Chem) thesis. Kazan', 1999. 436 p.

8. Hanson M.J., Stefan H.G. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // Water Resour. Bull. 1984. V. 20. P. 889–900. doi: 10.1111/j.1752-1688.1984.tb04797.x.

9. WoRMS Editorial Board (2016). World Register of Marine Species // URL: <http://www.marinespecies.org> (accessed: 20.05.2016).

Принятая к рассмотрению статья направляется рецензенту, при наличии замечаний она отсылается авторам на доработку. Окончательное решение о принятии статьи к публикации принимается редколлегией журнала.

Верстка статьи для окончательной проверки и утверждения высылается авторам по электронной почте.





Российский журнал прикладной экологии  
420087 г. Казань, ул. Даурская, 28  
[www.rjae.ru](http://www.rjae.ru)