



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**2026 Том 34 № 2**

**DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2  
<http://journals.rudn.ru/ecology>**

**Научный журнал  
Издается с 1993 г.**

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

**Свидетельство о регистрации** ПИ № ФС 77-61176 от 30.03.2015 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

**Главный редактор**

*Савенкова Елена Викторовна*, доктор экономических наук, профессор, директор института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

**Заместители главного редактора**

*Киричук Анатолий Александрович*, доктор биологических наук, профессор, проректор по хозяйственной деятельности, директор департамента экологии человека и биоэлементологии института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

*Редина Маргарита Михайловна*, доктор экономических наук, профессор, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

**Ответственный секретарь редколлегии**

*Яценко Елена Борисовна*, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

**Члены редакционной коллегии**

*Аньези Валерио*, профессор, директор Итало-Российского экологического института, Университет Палермо, Палермо, Италия

*Бобровницкий Игорь Петрович*, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заместитель начальника по научной работе филиала № 2 ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Министерства обороны РФ, Красногорск, Российская Федерация

*Валеева Наиля Гарифовна*, кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой иностранных языков института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

*Ванг Дели*, профессор, декан школы наук об окружающей среде Северо-Восточного педагогического университета, Чанчунь, Китай

*Джан Шупинь*, доктор наук, профессор Шаньдунского университета, Цзинань, Китай

*Розенберг Геннадий Самуилович*, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник Института экологии Волжского бассейна, Самарский федеральный исследовательский центр, Российская академия наук, Тольятти, Российская Федерация

*Савин Игорь Юрьевич*, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик, заведующий отделением генезиса, географии, классификации и цифровой картографии Почвенного института имени В.В. Докучаева, Российская академия наук, профессор департамента рационального природопользования института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

*Сабьков Владислав Александрович*, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией катализаторов глубокого окисления Института катализа имени Г.К. Борескова, Сибирское отделение Российской академии наук, отдел гетерогенного катализа, Новосибирск, Российская Федерация

*Скальный Анатолий Викторович*, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской элементологии медицинского института РУДН, Москва, Российская Федерация

*Хаустов Александр Петрович*, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

*Широкова Вера Александровна*, доктор географических наук, профессор, заведующая отделом истории наук о Земле Института истории естествознания и техники имени С.И. Вавилова, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

# ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ISSN 2313-2310 (Print), ISSN 2408-8919 (Online)

Периодичность: ежеквартально

Языки публикаций: русский, английский.

Журнал индексируется в Белом списке РЦНИ, ПИИЦ, DOAJ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Dimensions.

## Цели и тематика

Цели журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности» – повышение эффективности научных исследований в области охраны окружающей среды и экологии человека и распространение современных методов исследования и новейших достижений в области рационального природопользования.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по научным специальностям 1.5.15. Экология (биологические науки), 1.5.15. Экология (технические науки), 1.6.21. Геоэкология (географические науки), 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки), 1.6.21. Геоэкология (технические науки).

Начиная с 1993 г. в журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных работ ученых, преподавателей, аспирантов в виде научных исследовательских и обзорных статей, научных сообщений по следующим направлениям: общая экология, природопользование, устойчивое развитие, экологическая безопасность, защита окружающей среды, экология человека, экологическая экспертиза, радиоэкология и радиационный контроль, оценка состояния окружающей среды и экологическое образование. К рассмотрению принимаются материалы по результатам оригинальных научных исследований представителей высших учебных заведений и научных центров России и зарубежных стран.

Кроме научных статей публикуется хроника научной жизни, включающая рецензии, обзоры, информацию о конференциях, научных проектах и т. д. Для привлечения к научным исследованиям и повышения качества квалификационных работ журнал предоставляет возможность публикации статей, написанных по материалам лучших магистерских работ.

Правила оформления статей, архив и дополнительная информация размещены на сайте: <http://journals.rudn.ru/ecology>

**Редактор И.Л. Панкратова**  
**Редактор англоязычных текстов К.Л. Уланова**  
**Компьютерная верстка Т.Н. Селивановой**

### Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

### Адрес редакционной коллегии журнала:

Российская Федерация, 113093, Москва, Подольское шоссе, д. 8, корп. 5  
Тел.: +7 (495) 952-70-28; e-mail: [ecoj@rudn.ru](mailto:ecoj@rudn.ru)

---

Подписано в печать 25.05.2026. Выход в свет 29.05.2026. Формат 70×108/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».  
Усл. печ. л. 11,9. Тираж 500 экз. Заказ № 550. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»  
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН  
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY

2026 VOLUME 34 NO. 2

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2

<http://journals.rudn.ru/ecology>

Founded in 1993

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

### Editor-in-Chief

*Elena V. Savenkova*, Dr. of Sciences in Economics, Professor, Director of the Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

### Deputy Editors-in-Chief

*Anatoly A. Kirichuk*, Dr. of Sciences in Biology, Docent, Vice-Rector for Economic Activity, Director of the Department of Human Ecology and Bioelementology, RUDN University, Moscow, Russian Federation

*Margarita M. Redina*, Doctor of Sciences in Economics, Docent, Professor of the Department of Environmental Security and Product Quality Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

### Executive Secretary

*Elena B. Yatsenko*, Cand. of Technical Sciences, Deputy Director on Scientific Work, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

### Editorial Board

*Valerio Agnesi*, Professor, Director of the Italian-Russian Ecological University, Professor at University of Palermo, Palermo, Italy

*Igor P. Bobrovnikskii*, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Science in Medicine, Professor, Deputy Head on Scientific Work in Branch No. 2 "National Medical Research Center for High Medical Technologies — A.A. Vishnevsky Central Military Clinical Hospital" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Krasnogorsk, Russian Federation

*Nailya G. Valeeva*, Cand. of Pedagogical Sciences, Docent, Head of the Department of Foreign Languages, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

*Deli Wang*, Ph.D., Professor, Dean of the School of Life Science, Northeast Normal University, Changchun, China

*Shuping Zhang*, Ph.D., Professor, Shandong University, Jinan, China

*Gennadiy S. Rozenberg*, Dr of Biological Sciences, Professor, Chief Scientist of the Institute of Ecology of Volga River Basin, — branch of Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Ecosystem Modeling, Tolyatti, Russian Federation

*Igor Yu. Savin*, Dr of Science in Agriculture, Professor, Academic, Head of the Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Cartography of Soils, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

*Vladislav A. Sadykov*, Dr. of Science in Chemistry, Professor, Head of the Laboratory of Deep Oxidation Catalysts, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

*Anatoly V. Skalny*, Doctor of Science Medicine, Professor, Head of the Department of Medical Elementology, Institute of Medicine, RUDN University, Moscow, Russian Federation

*Aleksandr P. Khaustov*, Dr. of Science in Geology, Professor, Leading Specialist at Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

*Vera A. Shirokova*, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of the History of Earth Sciences, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY**  
**Published by the Peoples' Friendship University of Russia**  
**named after Patrice Lumumba (RUDN University)**

**ISSN 2313-2310 (Print), ISSN 2408-8919 (Online)**

**Frequency:** Quarterly

**Publication languages:** Russian, English

**The Journal is indexed:** *White List (RCSI), Russian Index of Science Citation, DOAJ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Dimensions.*

**Aims and Scope**

An efficiency increase in the field of environmental protection and scientific research of human ecology, as well as the spread of modern methods of research and the latest achievements in the field of environmental management are the aims of RUDN Journal of Ecology and Life Safety. Since 1993, the journal has published the results of fundamental and applied works of scientists, teachers, postgraduates in the form of scientific research and review articles, scientific reports in the following areas: general ecology, nature management, sustainable development, environmental safety, environmental protection, human ecology, environmental expertise, radioecology and radiation control, environmental assessment environment and environmental education. Materials based on the results of original scientific research of representatives of higher educational institutions and scientific centers of Russia and foreign countries are accepted for consideration.

In addition to scientific articles, a chronicle of scientific life is published, including reviews, reviews, information about conferences, scientific projects, etc. To attract to scientific research and improve the quality of qualifying papers, the journal provides the opportunity to publish articles written based on the materials of the best master's papers.

Chronicle of scientific events, including reviews, information about conferences, research projects, etc. are published in addition to scientific articles.

Journal allows publication of articles based on the best master's thesis for the purpose of intensification of research activity and improving the quality of qualification works.

Author guidelines, archive and other information are available on the website: <http://journals.rudn.ru/ecology>

**Copy Editor** *I.L. Pankratova*  
**English Text Editor** *K.L. Ulanova*  
**Layout Designer** *T.N. Selivanova*

**Address of the editorial office:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Tel.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Address of the editorial board of the journal:**

8 Podolskoye Shosse, bldg 5, Moscow, 113093, Russian Federation  
Tel.: +7 (495) 952-70-28; e-mail: [ecoj@rudn.ru](mailto:ecoj@rudn.ru)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba  
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House  
3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Tel.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭКОЛОГИЯ

- Shaibu O., Kirichuk A.A.** Multi-scale landscape responses of vegetation to urban growth in Makurdi, Nigeria (**Шаибу О., Киричук А.А.** Многомасштабные ландшафтные реакции растительности на рост городов в Макурди, Нигерия) ..... 205
- Бондаренко А.В., Бондарь В.В., Бондаренко А.А.** Эколого-географические исследования авифауны Алтая во второй половине XX века ..... 223
- Калюжная О.Д., Польшова Г.В.** Эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum* ..... 237
- Третьякова А.Б., Мукминов М.Н., Шамаев Н.Д.** Может ли использование пестицидов представлять угрозу для пчелиных колоний в аграрном секторе..... 245
- Pisarski Jr. M.R.** Birdwatching as a regenerative tourism practice: evidence from Brazilian public policy (**Писарски мл. М.Р.** Наблюдение за птицами как практика регенеративного туризма: свидетельства из государственной туристской политики Бразилии) ..... 257

### ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

- Кунденок С.Б., Волкова В.Н., Марков Д.Л., Финкельштейн А.С., Казанцев И.М.** Совершенствование метода очистки сточных вод от загрязнений растительно-животного происхождения ..... 275
- Майданов К.В., Тарлева А.Ф., Герасимов Ю.В., Сайфуллин Р.Р.** Загрязнение Угличского водохранилища микропластиком: его содержание и распределение в абиотических компонентах водной экосистемы ..... 293
- Курзенёв И.Р., Василенко Т.А.** Исследование физико-химических свойств и микробиоценоза целлюлозосодержащего волокна — побочного продукта производства кормов для животных ..... 306

### ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Кучер Д.Е., Дмитриев В.А.** Геоэкологическая оценка структурной устойчивости горного города на основе морфологического анализа и метода CRITIC ..... 321

## CONTENTS

### ECOLOGY

- Shaibu O., Kirichuk A.A.** Multi-Scale landscape responses of vegetation to urban growth in Makurdi, Nigeria ..... 205
- Bondarenko A.V., Bondar V.V., Bondarenko A.A.** Ecological and geographical studies of the Altai avifauna in the second morning of the 20th century ..... 223
- Kalyuzhnaya O.D., Polynova G.V.** Ecological and toxicological assessment of the effect of trifluralin on *Paramecium caudatum* ..... 237
- Tretiakova A.B., Mukminov M.N., Shamaev N.D.** May the use of pesticides pose a threat to bee colonies in the agricultural sector..... 245
- Pisarski Jr. M.R.** Birdwatching as a regenerative tourism practice: evidence from Brazilian public policy ..... 257

### INDUSTRIAL ECOLOGY

- Kundenok S.B., Volkova V.N., Markov D.L., Finkelshtein A.S., Kazantsev I.M.** Improving the method of wastewater treatment from plant-animal pollutants..... 275
- Maydanov K.V., Tarleva A.F., Gerasimov Y.V., Saifullin R.R.** Microplastic pollution of the Uglich Reservoir: its content and distribution in abiotic components of the aquatic ecosystem..... 293
- Kurzenev I.R., Vasilenko T.A.** Research of the physico-chemical properties and microbiocenosis of cellulose-containing fiber – a by-product of the production of animal feed..... 306

### GEOECOLOGY

- Kucher D.E., Dmitriev V.A.** Geoecological assessment of the structural stability of a mountain city based on morphological analysis and the CRITIC method ..... 321



# ЭКОЛОГИЯ ECOLOGY


DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-205-222

EDN: PKLJEW

UDC 581.5

Research article / Научная статья

## Multi-Scale Landscape Responses of Vegetation to Urban Growth in Makurdi, Nigeria

Ochoche Shaibu, Anatoly A. Kirichuk  *RUDN University, Moscow, Russian Federation* [kirichuk-aa@rudn.ru](mailto:kirichuk-aa@rudn.ru)

**Abstract.** Rapid urban expansion is reshaping landscapes across Sub-Saharan Africa, but its effects on vegetation structure remain underexplored. This study examines vegetation responses to urban growth in Makurdi, Nigeria, from 2000–2025, using land-use/land-cover analysis and landscape metrics. Urban intensity zones were delineated to account for spatial variability of anthropogenic impact, and vegetation structure was assessed at class and landscape levels with FRAGSTATS. The results show extensive growth in development accompanied by vegetation decline and fragmentation. Low-intensity zones retained cohesion, while moderate-intensity zones experienced the greatest fragmentation and loss of dominance, indicating their high vulnerability. High-intensity zones remained degraded, with small, isolated remnants. The landscape metrics further reveal increasing fragmentation, edge complexity, and heterogeneity, alongside declining cohesion. These findings highlight scale-dependent vegetation responses and demonstrate the value of configuration-based metrics for ecological insight. The multi-scale framework provides a robust basis for urban planning aimed at conserving vegetation integrity in rapidly growing African cities.

**Keywords:** vegetation fragmentation, landscape metrics, urban intensity zones

**Authors' contribution.** *O. Shaibu* — conceptualization, conducting research, preparing a manuscript. *A.A. Kirichuk* — methodology, final version of the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Data availability.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history:** received 22.01.2026; revised 15.02.2026; accepted 26.02.2026.

© Shaibu O., Kirichuk A.A., 2026




This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**For citation:** Shaibu O, Kirichuk AA. Multi-scale landscape responses of vegetation to urban growth in Makurdi, Nigeria. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):205–222. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-205-222> EDN: PKLJEW

## Многомасштабные ландшафтные реакции растительности на рост городов в Макурди, Нигерия

О. Шаibu, А.А. Киричук  

*Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация*

 kirichuk-aa@rudn.ru

**Аннотация.** Быстрое расширение городов меняет ландшафты по всей Африке к югу от Сахары, однако его влияние на структуру растительности остается недостаточно изученным. Авторами изучены реакции растительности на рост городов в Макурди, Нигерия, в период с 2000 по 2025 г. с использованием анализа землепользования/землепокрытия и ландшафтных метрик. Выделены зоны интенсивности урбанизации для учета пространственной изменчивости антропогенного воздействия, а структура растительности оценивалась на уровне классов и ландшафтов с помощью FRAGSTATS. Результаты показывают обширный рост застройки, сопровождающийся сокращением и фрагментацией растительности. Зоны низкой интенсивности сохранили целостность, в то время как зоны средней интенсивности испытали наибольшую фрагментацию и потерю доминирования, что указывает на их высокую уязвимость. Зоны высокой интенсивности оставались деградированными, с небольшими изолированными остатками. Ландшафтные метрики дополнительно показывают усиление фрагментации, сложности границ и неоднородности наряду со снижением связности. Эти результаты подчеркивают зависимость реакции растительности от масштаба и демонстрируют ценность метрик, основанных на конфигурации, для экологического анализа. Многомасштабная структура обеспечивает надежную основу для городского планирования, направленного на сохранение целостности растительности в быстрорастущих африканских городах.

**Ключевые слова:** фрагментация растительности, ландшафтные метрики, зоны городской интенсивности

**Вклад авторов.** *Шаibu О.* — разработка концепции, проведение исследования, подготовка рукописи. *Киричук А.А.* — методология, разработка концепции, окончательная версия рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**История статьи:** поступила в редакцию 22.01.2026; доработана после рецензирования 15.02.2026; принята к публикации 26.02.2026.

**Для цитирования:** *Shaibu O., Kirichuk A.A.* Multi-scale landscape responses of vegetation to urban growth in Makurdi, Nigeria // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 205–222. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-205-222> EDN: PKLJEW

## Introduction

Urbanization is a defining global trend of the 21st century, reshaping land-use patterns and undermining natural habitats [1; 2]. Expanding built environments displace vegetation, intensifying fragmentation and reducing ecological resilience [1; 3]. These impacts are most severe in rapidly developing regions where urban growth often outpaces conservation planning [3; 4], producing heterogeneous landscapes with degraded vegetation and diminished ecosystem services [5; 6]. Urban vegetation supports biodiversity, regulates microclimates, and sustains green infrastructure [7–9]. Yet, habitat conversion disrupts spatial configurations, creating fragmented mosaics of isolated patches with reduced connectivity and heightened edge effects, threatening species persistence [10–13]. Thus, fragmentation and heterogeneity are critical indicators of urban ecological health, reflecting both quantitative vegetation loss and qualitative degradation of spatial patterns [14; 15].

Assessing these dynamics requires integrating remote sensing with landscape metrics. Remote sensing enables multi-temporal land-use/land-cover (LULC) mapping, while metrics quantify patch size, connectivity, and configuration [16; 17]. Urban growth typically increases patch isolation, reduces mean patch area, and elevates edge density, signaling ecological vulnerability [18]. Standardized metrics such as Percentage of Landscape (PLAND), Number of Patches (NP), Edge Density (ED), and Contagion (CONTAG) via FRAGSTATS provide robust measures of structural complexity [16].

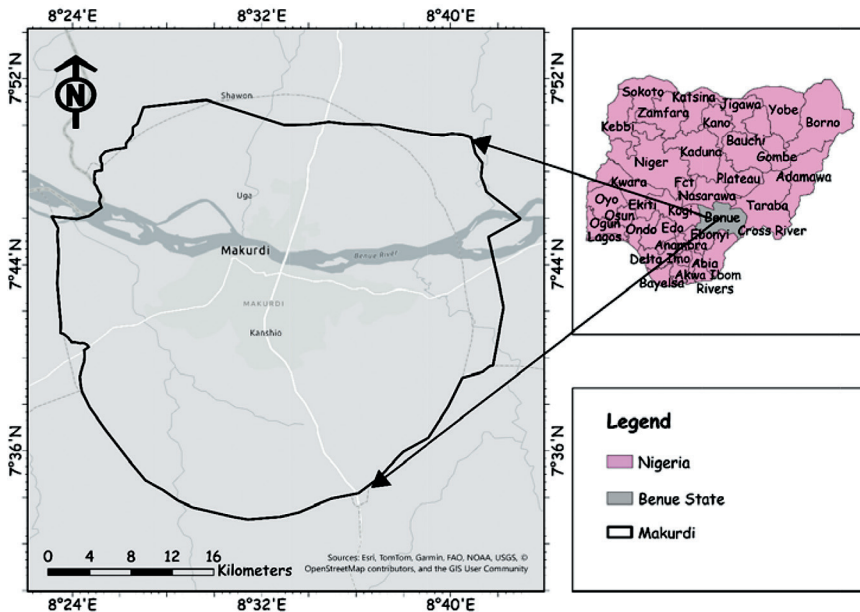
Despite global applications, multi-scale analyses remain scarce in Sub-Saharan Africa, where medium-sized cities experience some of the fastest growth rates [19]. Studies in Malawi and Accra highlight vegetation decline and fragmentation but often rely on isolated metrics or lack gradient-based approaches [20; 21]. Consequently, little is known about how vegetation structure varies along urbanization gradients or how multi-scale patterns emerge from specific growth processes [22; 23]. In cities such as Makurdi, rapid expansion continues without systematic evaluation of vegetation responses. The absence of advanced landscape ecology frameworks limits ecological assessments and biodiversity integration into urban planning [24]. To address this gap, we examine vegetation dynamics in Makurdi (2000–2025) using night-time light (NTL) gradients and FRAGSTATS metrics across urban, peri-urban, and rural zones. This multi-scale approach expands the geographic and methodological scope of urban ecology and provides a data-driven foundation for planning strategies that balance growth with ecological sustainability.

## Materials and methods

### Study Area Description

This study focuses on Makurdi, the administrative capital of Benue State, Nigeria, located between latitudes 7°38'N–7°50'N and longitudes 8°24'E–8°48'E (see Figure 1). The city lies within the Benue Trough at an elevation of 93–105 m above sea level and is bisected by the Benue River, its dominant hydrological landmark [25]. Makurdi falls within the Southern Guinea Savanna zone, characterized by a sub-humid tropical climate (Köppen Aw) with mean annual rainfall of 1,250–1,500 mm [26]. Natural vegetation includes gallery forests along riverbanks and deciduous savanna woodlands with species such as *Azelia africana* and *Daniellia oliveri* [27].

Between 2000 and 2025, Makurdi has grown into a major regional hub linking Nigeria’s southeastern and northern corridors. Its strategic location and role as a state capital have driven rapid population growth and spatial expansion exceeding 4% annually.<sup>1</sup> Urban development is dominated by unplanned horizontal sprawl, converting fertile floodplains and upland woodlands into residential and commercial areas [28]. This expansion has produced a fragmented landscape where built-up areas increasingly encroach on ecologically sensitive wetlands, making Makurdi a critical case for assessing long-term impacts of urbanization on vegetation integrity [28; 29].



**Figure 1.** Study Area Map

Source: compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

<sup>1</sup> United Nations. World Population Prospects. Available from: <https://population.un.org/wpp/> (accessed: 09.02.2026).

## Analytical Framework and Study Design

This study employs an integrated framework combining land-cover mapping, landscape pattern analysis, and urban intensity modeling to assess vegetation responses across multiple spatial scales. By linking class- and landscape-level metrics with urban pressure gradients derived from night-time light data, the approach captures both localized fragmentation and broader landscape restructuring driven by urban expansion. A multi-scale zonal design was adopted to improve interpretability and provide a robust basis for evaluating how vegetation reorganizes under increasing anthropogenic influence. The conceptual framework is presented in Figure 2, while detailed procedural steps are outlined in Figure 3.

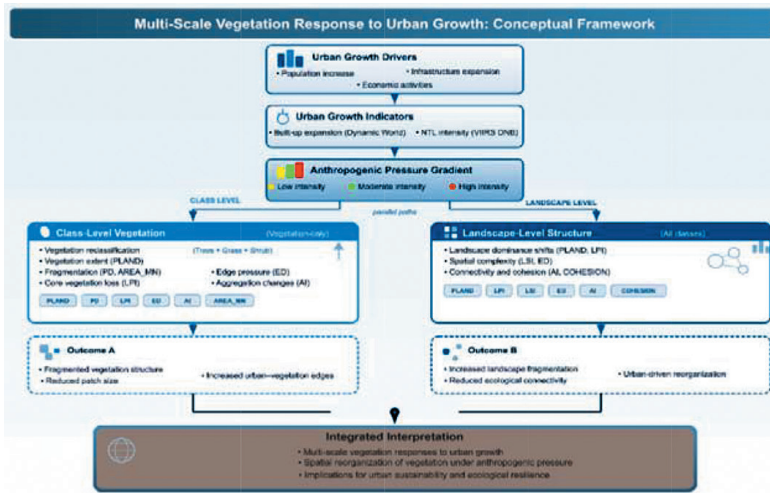


Figure 2. Conceptual Framework

Source: compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

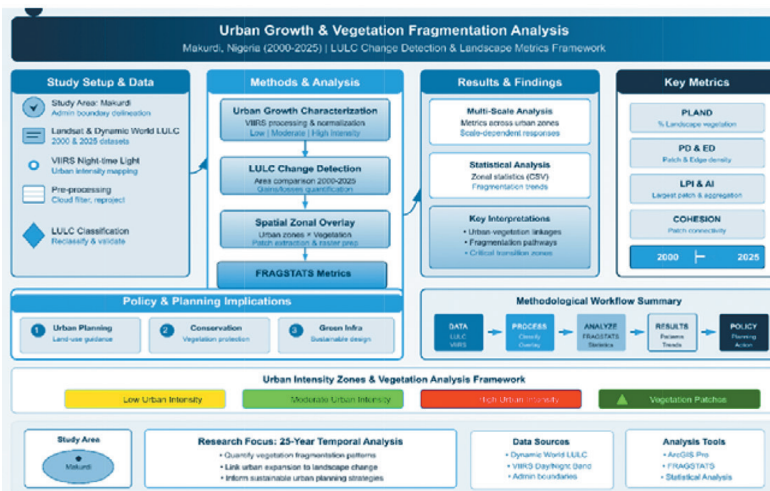


Figure 3. Flowchart of Methodological Framework

Source: compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

### ***Data Acquisition and Pre-processing***

We integrated multi-source geospatial datasets spanning 25 years to capture land-cover dynamics and urban intensity. Contemporary LULC data (2025) were derived from the Dynamic World V1 dataset using Sentinel-2 imagery (10 m resolution), while baseline data (2000) were manually classified in ArcGIS Pro from high-resolution historical imagery to ensure consistency. Night-time light (NTL) data from VIIRS Day/Night Band annual composites provided cloud-filtered radiance values as proxies for urban activity and infrastructure expansion. Administrative boundaries defined the study extent, and all datasets were projected to a common coordinate system and resampled to uniform resolution. Nearest-neighbor resampling preserved categorical integrity for LULC data.

### ***Land-Use/Land-Cover Classification and Change Detection***

We applied supervised classification to delineate five classes: built-up, vegetation, agriculture, bare land, and water. For 2000 data, a Random Forest (RF) classifier was used in ArcGIS Pro due to its robustness with complex remote sensing datasets. Accuracy was assessed via confusion matrices, overall accuracy, and Kappa coefficients. Post-classification comparison generated LULC transition matrices, enabling computation of per-class area changes and annual transformation rates. This approach aligns with established methodologies for urban change analysis in rapidly expanding African cities [30–32].

### ***Vegetation Reclassification and Raster Preparation***

To emphasize ecological processes, LULC classes were reclassified into vegetation (trees, grass, shrubs) and non-vegetation (built-up, bare land, water) groups [33; 34]. Binary vegetation rasters for 2000 and 2025 served as inputs for class-level analysis, while original multi-class rasters supported landscape-level assessments. All rasters were exported as 16-bit signed integer GeoTIFFs to meet FRAGSTATS requirements, ensuring consistent spatial extent and precise cell alignment.

### ***Urban Growth Intensity Assessment***

Urban growth intensity was quantified using NTL radiance as a proxy for settlement density and infrastructure. Annual NTL composites were clipped to Makurdi's boundary to generate continuous illumination surfaces. Radiance values were classified into low, moderate, and high-intensity zones using percentile thresholds, following established methods [35–38]. This avoided arbitrary classification and ensured categories reflected relative human activity. Validation through visual comparison confirmed alignment with built-up patterns and peri-urban expansion.

### ***Linking Vegetation Structure to Urban Growth Intensity***

We employed a zonal analysis linking vegetation metrics to urban intensity gradients. Vegetation rasters (2000 and 2025) were masked by low, moderate, and high-intensity zones, and FRAGSTATS was applied separately to each. This enabled computation of class-level metrics within distinct urban environments, allowing vegetation change to be interpreted as a differentiated response to anthropogenic pressure rather than a simple temporal shift. The framework provided a process-driven perspective on landscape reorganization.

### ***Multi-Scale Landscape Metric Analysis***

Landscape pattern analysis was conducted at both class and landscape levels using FRAGSTATS [39; 40].

- Class-level (vegetation only):
  - Extent: Percentage of Landscape (PLAND);
  - Fragmentation: Patch Density (PD);
  - Dominance: Largest Patch Index (LPI);
  - Edge effects: Edge Density (ED);
  - Connectivity: Mean Patch Area (AREA\_MN), Aggregation Index (AI)
- Landscape-level (all LULC classes):
  - Fragmentation & dominance: PD, LPI;
  - Boundary complexity: ED, Landscape Shape Index (LSI);
  - Connectivity: Cohesion Index (COHESION), AI.

By integrating vegetation-specific metrics with systemic indicators, this multi-scale framework captured scale-dependent responses, linking localized vegetation loss to broader urban-driven transformations.

## **Results**

### ***Land Use/Land Cover Change Results***

Table 1 summarizes LULC distribution in Makurdi between 2000 and 2025. The results reveal a marked landscape reorganization, with divergent trends across major land-cover classes. Vegetation remained dominant but declined from 77.5% in 2000 to 71.8% in 2025, highlighting mounting pressure on natural and semi-natural ecosystems. Built-up land expanded substantially, increasing from 103.10 km<sup>2</sup> (11.6%) to 146.60 km<sup>2</sup> (16.5%), reflecting rapid urban growth and intensifying anthropogenic influence. Cropland also rose moderately to 59.80 km<sup>2</sup>, indicating agricultural expansion alongside urbanization. Water bodies showed a slight increase to 3.7%, while bare land remained stable at 1.3%.

Overall, urban expansion and the redistribution of vegetated land emerged as the primary drivers of change. These area-based shifts provide essential context for subsequent analyses of spatial configuration and fragmentation. Figure 4 illustrates the spatial distribution of these transformations across the study area.

Table 1. Land-Use/Land-Cover Distribution and Changes in Makurdi, 2000–2025

LULC ID	LULC Class	Area 2000, km <sup>2</sup>	Share 2000, %	Area 2025, km <sup>2</sup>	Share 2025, %
1	Waterbody	30.40	3.40	33.30	3.70
2	Vegetation	689.60	77.50	638.90	71.80
3	Cropland	54.80	6.20	59.80	6.70
4	Bareland	11.80	1.30	11.30	1.30
5	Built-up	103.10	11.60	146.60	16.50

Note: Percentages represent proportional coverage of the total study area.

Source: compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

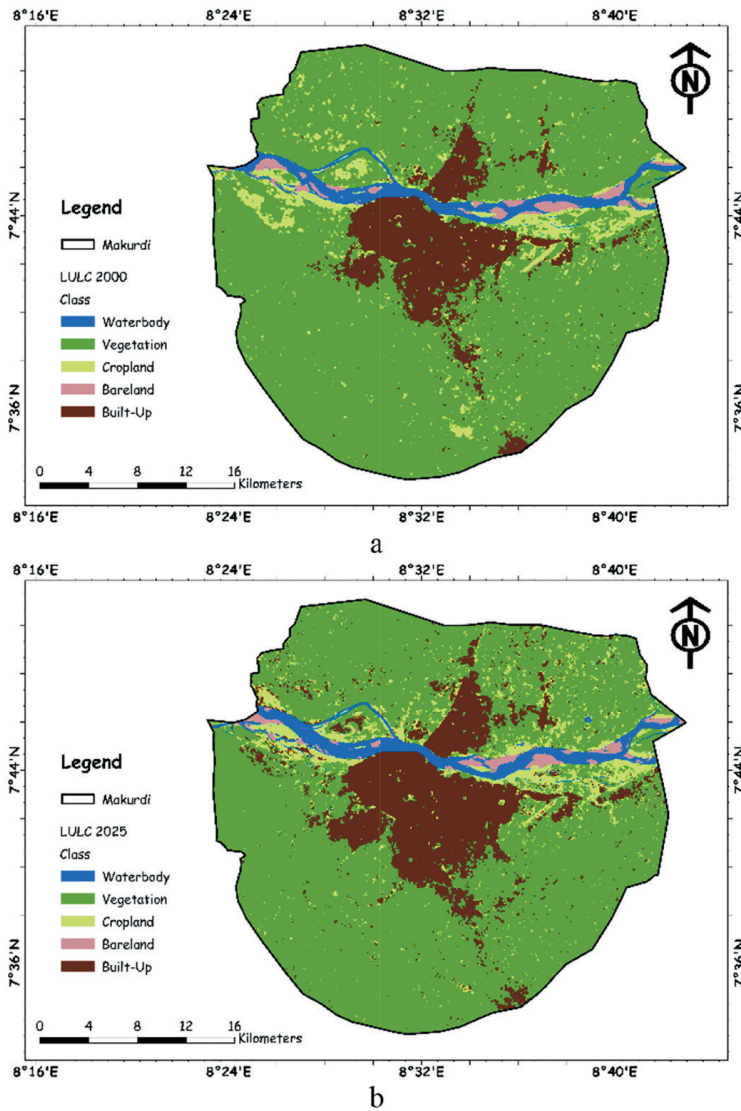


Figure 4. Spatio-temporal patterns of land-use/land-cover in Makurdi showing (a) the 2000 and (b) the 2025 LULC maps, highlighting urban expansion and associated landscape transformation across the study area

Source: compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

### **Class-Level Vegetation Responses across Urban Intensity Zones**

Vegetation metrics were categorized by urban intensity zones to assess structural responses under varying human pressure (Table 2). Results show clear contrasts across low, moderate, and high-intensity areas in both 2000 and 2025.

In low-intensity zones, vegetation occupied a large share of the landscape, with low patch density, strong dominance of the largest patches, and high aggregation. These conditions reflect cohesive vegetation structures in areas with limited anthropogenic disturbance. In moderate-intensity zones, vegetation declined substantially, with smaller, more numerous, and less aggregated patches. This fragmentation indicates transitional landscapes where urban expansion and natural cover coexist, underscoring the vulnerability of these buffer zones to ongoing land-use change. In high-intensity zones, vegetation was minimal, highly fragmented, and weakly aggregated, with negligible dominance. Remaining vegetation persisted only as small, isolated remnants embedded within a built-up matrix, highlighting the severe impact of dense urbanization on spatial integrity.

*Table 2. Vegetation Landscape Metrics Across Urbanization Gradients in Makurdi for 2000 and 2025*

<b>Urbanization Gradient</b>	<b>Year</b>	<b>PLAND, %</b>	<b>PD, patches/ha</b>	<b>LPI, %</b>	<b>ED, m/ha</b>	<b>AREA_MN, m</b>	<b>AI, %</b>
Low Intensity	2000	53.56	0.0032	34.73	2.94	16,614.53	95.35
	2025	51.68	0.0032	33.63	3.86	16,030.26	93.06
Moderate Intensity	2000	5.46	0.0153	3.49	1.93	356.71	62.79
	2025	3.75	0.0250	1.39	1.59	150.09	54.90
High Intensity	2000	0.46	0.0145	0.09	0.34	31.87	18.60
	2025	0.27	0.0081	0.09	0.19	33.99	25.00

*Note.* PLAND = Percentage of Landscape, %; PD = Patch Density (number of patches per hectare); LPI = Largest Patch Index, %; ED = Edge Density (m/ha); AREA\_MN = Mean Patch Area, m ; AI = Aggregation Index, %. Metrics describe vegetation structure and spatial configuration across urbanization gradients.

*Source:* compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

### **Temporal Changes in Vegetation Structure within Urban Intensity Zones**

Comparisons of class-level metrics between 2000 and 2025 (Table 2) reveal distinct temporal responses to urban expansion. In low-intensity zones, vegetation remained largely stable, though slight declines in Aggregation Index (AI) and mean patch size (AREA\_MN) suggest gradual fragmentation. Despite these subtle shifts, vegetation maintained a cohesive spatial arrangement. In moderate-intensity zones, vegetation exhibited the most pronounced changes. Between 2000 and 2025, dominance and aggregation declined sharply, while fragmentation intensified. These results identify moderate zones as critical ecological interfaces, highly sensitive to urban growth and vulnerable to structural reorganization. In high-intensity zones, vegetation showed little temporal variation. Already severely fragmented by 2000, these areas remained degraded, with persistently low dominance and weak aggregation. This stability reflects conditions where urban pressure had already surpassed thresholds necessary for maintaining coherent vegetation structures prior to the baseline year.

### **Landscape-Level Spatial Structure Dynamics**

Landscape-level metrics (Table 3) highlight systemic restructuring between 2000 and 2025. Patch density increased, indicating progressive subdivision of the landscape into smaller units and a shift from a continuous matrix to a segmented mosaic. The Largest Patch Index (LPI) declined, reflecting reduced dominance of large patches and greater influence of smaller, fragmented units. Concurrently, landscape shape complexity increased, with more irregular boundaries and heightened heterogeneity. Rising edge density further underscores the growing complexity of interactions between adjacent land-cover types.

Connectivity metrics showed slight declines, suggesting marginal weakening of cohesion and aggregation. Although values remained relatively high, the downward trend indicates that expanding anthropogenic land uses are beginning to disrupt regional continuity. Collectively, these findings demonstrate that by 2025, Makurdi’s landscape had transitioned toward a fragmented, heterogeneous structure. This system-wide reorganization provides essential context for the vegetation-level fragmentation patterns identified earlier.

*Table 3. Landscape-Level Metrics for Makurdi LULC Structure in 2000 and 2025*

Year	PD, patches/100 ha	LPI, %	ED, m/ha	LSI (–)	COHESION, %	AI, %
2000	0.96	39.63	8.93	8.79	99.93	99.58
2025	4.75	36.97	17.97	16.68	99.92	99.13

*Note.* PD = Patch Density; LPI = Largest Patch Index; ED = Edge Density; LSI = Landscape Shape Index; COHESION = Patch Cohesion Index; AI = Aggregation Index. PD is expressed as number of patches per 100 ha, ED as meters per hectare, LPI and AI as percentages, while LSI is dimensionless.

*Source:* compiled by O. Shaibu, A.A. Kirichuk.

### **Integrated Multi-Scale Interpretation of Results**

Across both class- and landscape-level analyses, vegetation responses to urban growth in Makurdi proved scale-dependent and spatially differentiated. Landscape metrics revealed a general increase in fragmentation and complexity, while class-level results showed these changes were most acute in moderate and high-intensity zones. Our findings emphasize that area-based assessments alone cannot capture the full extent of vegetation transformation. Configuration shifts fragmentation, dominance, and aggregation offer deeper insight into how vegetation reorganizes under urban pressure. The zonal framework highlights that degradation intensifies along the urbanization gradient, confirming that urban growth in Makurdi is a heterogeneous process with varying ecological impacts across the urban–rural continuum.

## **Discussion**

### **Result Discussion**

In this study, we investigated the multi-scale responses of vegetation to urban growth in Makurdi, Nigeria, over a twenty-five-year trajectory (2000–2025). By integrating LULC transitions with landscape metrics and urban intensity gradients,

our results offer compelling evidence that the structural integrity of Makurdi's vegetation has been compromised by urban expansion, specifically within moderate and high-intensity zones. The nuanced fragmentation patterns identified here reflect broader ecological and urban dynamics documented in other rapidly urbanizing regions of Sub-Saharan Africa and beyond.

Our analysis of landscape composition (see Table 1) revealed a consistent decline in vegetation proportion alongside a sharp increase in built-up areas. This trend aligns with findings from other Nigerian cities, where accelerated urban sprawl has led to the substantial depletion of ecological assets, including natural vegetation and open green spaces [41–43]. Similar declines in vegetation and rising fragmentation have been observed across Nigeria's rainforest and Guinea savanna regions as urban footprints expand, underscores the pervasive influence of urbanization on West African natural landscapes [43; 44].

At the class level, our results demonstrate that vegetation structure becomes increasingly fragmented as urban intensity rises (see Table 2). The elevated patch density and reduced aggregation in these zones suggest that urban development has systematically disrupted the spatial coherence of vegetated land. Such structural responses are consistent with urban greenness fragmentation patterns observed globally, where rising patch density and edge effects follow the subdivision of green space due to sprawl [45–48]. These trends are ecologically significant, as they are frequently linked to reduced habitat connectivity, biodiversity loss, and impaired ecosystem functioning [46; 47; 49].

The observed increase in system-wide fragmentation (see Table 3) further supports the interpretation that Makurdi's overall spatial structure has become more complex and heterogeneous. Metrics such as patch density, edge density, and the landscape shape index all of which reflect landscape subdivision and boundary irregularity increased from 2000 to 2025. Literature suggests these changes indicate a transition toward landscapes where anthropogenic uses prevail at the expense of natural continuity. For instance, studies have highlighted that increases in patch density and shape complexity typically accompany neighborhood expansion, creating mosaic landscapes with diminished ecological cohesion [50–52].

Connectivity-related metrics, including cohesion and aggregation, showed subtle declines, suggesting a gradual weakening of landscape continuity. This shift carries substantive ecological implications; fragmentation-induced reductions in connectivity can hinder species dispersal and compromise ecological resilience. These consequences are well-documented in landscape ecology, where diminished connectivity is associated with compromised ecosystem services and the reduced long-term viability of urban vegetation patches [53–55].

By integrating urban intensity gradients, we gained additional insight into the spatial heterogeneity of these responses. Vegetation in low-intensity zones remained comparatively cohesive, indicating that areas with limited anthropogenic pressure

retain their structural integrity despite broader regional changes. Conversely, moderate and high-intensity zones exhibited severe fragmentation, reflecting the differential impacts of urbanization based on human influence levels. This finding reinforces the necessity of considering spatial heterogeneity in ecological assessments, as global metrics alone may obscure localized responses to anthropogenic pressure.

In the Sub-Saharan African context, urbanization is often characterized by rapid, unplanned expansion that exerts immense pressure on natural environments [56–59]. The patterns we observed in Makurdi mirror these regional trends, highlighting how urban growth reshapes both cover composition and spatial configuration. Furthermore, our multi-scale approach underscores that urban ecological assessments are most informative when they synthesize class-specific responses with overall landscape reorganization.

### ***Limitation of the Study***

Despite offering a comprehensive multi-scale assessment, this study has several limitations. First, reliance on two temporal snapshots (2000 and 2025) restricts detection of intermediate or non-linear dynamics, though imagery availability and cloud cover often constrain finer sampling in tropical regions. Second, landscape metrics, while informative, do not directly measure ecological functions such as species richness or habitat quality. Future work should integrate field-based data and higher-resolution environmental indicators.

Additionally, night-time light gradients, though robust proxies for anthropogenic pressure, may not fully capture socio-economic drivers such as land tenure or policy influences. Finally, landscape metrics are sensitive to classification accuracy and resolution; however, these concerns were mitigated through careful reclassification, zonal analysis, and multi-scale integration.

### ***Policy and Urban-Planning Implications***

The differentiated vegetation responses observed provide critical guidance for urban planning in Makurdi and similar Sub-Saharan cities. Moderate-intensity zones, where fragmentation is most severe, represent key intervention spaces. Policies should prioritize regulating land conversion, integrating green buffers, and protecting vegetation before thresholds are surpassed.

In low-intensity zones, cohesive vegetation can be preserved through zoning that discourages leapfrog development and promotes compact growth. High-intensity zones require ecological restoration urban parks, street trees, and riparian corridor protection to reconnect fragmented patches and sustain ecosystem services.

More broadly, embedding landscape metrics into routine monitoring and municipal planning offers a powerful tool for balancing development with ecological sustainability. By moving beyond area-based indicators, planners can evaluate the structural health of green spaces and design strategies that enhance resilience in rapidly urbanizing contexts.

## Conclusion

This study examined LULC dynamics and vegetation responses to urban growth in Makurdi (2000–2025) using a multi-scale landscape metrics framework. Findings show that urban expansion has driven both a measurable decline in vegetation extent and a profound reorganization of its spatial configuration. While built-up growth and green cover loss highlight anthropogenic influence, configuration-based metrics fragmentation, dominance, and aggregation provide deeper insight into vegetation system responses.

Class-level analysis revealed spatial differentiation along the urbanization gradient: vegetation in low-intensity zones remained cohesive, moderate zones showed the greatest structural sensitivity with accelerating fragmentation, and high-intensity zones reflected persistent degradation. At the landscape scale, rising patch density, edge complexity, and shape irregularity indicate a shift toward a fragmented, heterogeneous mosaic, while declining connectivity suggests weakening cohesion under continued sprawl.

Overall, vegetation degradation in Makurdi is a scale-dependent, spatially heterogeneous process. By identifying zones most vulnerable to fragmentation, this study provides a robust evidence base for integrating green infrastructure conservation into urban planning frameworks across rapidly growing Sub-Saharan African cities.

## References

- [1] Finizio M, Pontieri F, Bottaro Ch, Febraro M, Innangi M, Sona G, Carranza ML. Remote sensing for urban biodiversity: a review and meta-analysis. *Remote Sensing*. 2024;16(23):4483. <https://doi.org/10.3390/rs16234483> EDN: XHZSPE
- [2] Wang F, Jasmani Z, Hosni N. Landscape drivers of fauna biodiversity in urban green spaces: review of empirical studies and a management framework. *Ecosphere*. 2025;16(12):e70497. <https://doi.org/10.1002/ecs2.70497> EDN: ATKWXX
- [3] Rojas C, Sepúlveda E, Jorquera F, Munizaga Ju, Pino J. Accessibility disturbances to the biodiversity of urban wetlands due to built environment. *City and Environment Interactions*. 2022;13:100076. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100076> EDN: JMZOTC
- [4] Aad R, Zaher N, Dawalibi V, el Balaa R, Loukieh Ja, Nemer N. The application of landscape indicators for landscape quality assessment; case of Zahleh, Lebanon. *Sustainability*. 2025;17(19):8946. <https://doi.org/10.3390/su17198946> EDN: UTPWIU

- [5] Aduko Ju, Yakubu MA, Anokye K. Assessing the environmental impacts of urban sprawl on vegetation cover and ecosystem integrity in Wa municipality, Ghana. *World Development Sustainability*. 2025;6:100225. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100225> EDN: QRJMDM
- [6] Jiang S, Feng F, Zhang X, Xu Ch, Jia B, Laforteza R. Driving factors of fragmentation in urban landscapes: local contributions, spatial relationships, and causal effects. *Ecological Indicators*. 2025;174:113454. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113454> EDN: DEPPEG
- [7] Adegun OB, Ikudayisi AE, Morakinyo TE, Olusoga OO. Urban green infrastructure in Nigeria: A review. *Scientific African*. 2021;14:e01044. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01044> EDN: PSMJLL
- [8] Oropeza-Sánchez MT, Solano-Zavaleta I, Cuandón-Hernández WL, Martínez-Villegas JA, Palomera-Hernández V, Zúñiga-Vega JJ. Urban green spaces with high connectivity and complex vegetation promote occupancy and richness of birds in a tropical megacity. *Urban Ecosystems*. 2024;28:50. <https://doi.org/10.1007/s11252-024-01612-3>
- [9] Zhang L, Wang Y, Bian H, Gao J, Yuan Zh, Wang Z, Dai Y, Liu H. Understanding the ecological impacts of vertical urban growth in mountainous regions. *Ecological Informatics*. 2025;87:103079. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103079> EDN: TZAHMM
- [10] Chang S, Su K, Jiang X, You Y, Li C, Wang L. Impacts and predictions of urban expansion on habitat connectivity networks: a multi-scenario simulation approach. *Forests*. 2023;14(11):2187. <https://doi.org/10.3390/f14112187> EDN: TRZOLW
- [11] Zeng Ke, Ci M, Zhang Sh, Jin Z, Tang H, Zhu H, Zhang R, Wang Yu, Zhang Y, Liu M. Vegetation Baseline and Urbanization Development Level: Key Determinants of Long-Term Vegetation Greening in China's Rapidly Urbanizing Region. *Remote Sensing*. 2025;17(14):2449. <https://doi.org/10.3390/rs17142449> EDN: XIZAUM
- [12] Xu J, Ling Y, Sun Y, Jiang Yu, Shen R, Wang Yu. How do different processes of habitat fragmentation affect habitat quality? — Evidence from China. *Ecological Indicators*. 2024;160:111880. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111880> EDN: XTTQAAQ
- [13] Shi T, Xu H. Study on Ecosystem service values of urban green space systems in Suzhou City based on the extreme gradient boosting geographically weighted regression method: spatiotemporal changes, driving factors, and influencing mechanisms. *Land*. 2025;14(3):564. <https://doi.org/10.3390/land14030564> EDN: APGDJK
- [14] Zhou Ya, Geng J, Liu X. urban habitat quality enhancement and optimization under ecological network constraints. *Land*. 2024;13(10):1640. <https://doi.org/10.3390/land13101640> EDN: ZQJXNT
- [15] Zambrano L, Aronson MFJ, Fernandez T. The consequences of landscape fragmentation on socio-ecological patterns in a rapidly developing urban area: a case study of the National Autonomous University of Mexico. *Frontiers in Environmental Science*. 2019;7:152. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00152>
- [16] Thien BB, Phuong VT, Ioshpa AR. Assessing the environmental destruction in forest cover using landscape metrics and spatial analysis in Quang Nam province, Vietnam. *Environmental Earth Sciences*. 2025;84:360. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12377-z> EDN: DDFKNT
- [17] Müller N, Ignatieva M, Nilon CH, Werner P, Zipperer WC. Patterns and Trends in Urban Biodiversity and Landscape Design. In: *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*. Dordrecht: Springer; 2013. p. 123–144. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_10) EDN: VEKJMN

- [18] Pal T, Paul A, Maiti Ch, Podder T. Spatiotemporal analysis of land use and land cover dynamics using multi-temporal remote sensed imagery and quantifying landscape fragmentation: A case study of Chandannagar Municipal Corporation (CMC), West Bengal, India. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024;23(03):966–995. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.3.2664> EDN: YBRZWK
- [19] Kowe P, Mutanga O, Dube T. Advancements in the remote sensing of landscape pattern of urban green spaces and vegetation fragmentation. *International Journal of Remote Sensing*. 2021;42(10):3797–3832. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1881185> EDN: ZLGUDN
- [20] Nazombe K, Nambazo O. Monitoring and assessment of urban green space loss and fragmentation using remote sensing data in the four cities of Malawi from 1986 to 2021. *Scientific African*. 2023;20:e01639. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01639> EDN: SRFNYC
- [21] Bonsu K, Bonin O. Assessing landscape fragmentation and its implications for biodiversity conservation in the Greater Accra Metropolitan Area (GAMA) of Ghana. *Discover Environment*. 2023;1:22. <https://doi.org/10.1007/s44274-023-00023-z> EDN: DYSNVP
- [22] Zhou L, Wei L, López-Carr D, Dang X, Yuan B, Yuan Z. Identification of irregular extension features and fragmented spatial governance within urban fringe areas. *Applied Geography*. 2024;162:103172. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103172> EDN: FSMZZD
- [23] Hu Ch, Zeng H. The landscape pattern characteristics of urban built-up land significantly influence urban thermal comfort: Evidence from large cities in China. *Sustainable Cities and Society*. 2025;126:106402. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106402> EDN: IQGGNT
- [24] Cao Y, Wang Y, Li G, Fang X. Vegetation response to urban landscape spatial pattern change in the Yangtze River Delta, China. *Sustainability*. 2019;12(1):68. <https://doi.org/10.3390/su12010068>
- [25] Anene N, Abdulkadir A, Sunday A. Simulation and Prediction of Urbanization in Makurdi City, Nigeria using CA-Markov Technique. *FUTY Journal of the Environment*. 2020;14:12–21.
- [26] Abah RC. An application of Geographic Information System in mapping flood risk zones in a north central city in Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2013;7(6):365–371. <https://doi.org/10.5897/AJEST12.182>
- [27] Ogutu BO, D'Adamo F, Dash J. Impact of vegetation greening on carbon and water cycle in the African Sahel-Sudano-Guinean region. *Global and Planetary Change*. 2021;202:103524. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103524> EDN: TCKCLL
- [28] Iortyom ET, Semaka JT, Kargbo P. The effect of urban expansion on peripheral agricultural lands in Makurdi City. *European Journal of Development Studies*. 2022;2(4):100–108. <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2022.2.4.145> EDN: VAFYSH
- [29] Modu M, Yager G. The Effects of Urbanization on Wetland Ecosystem and Aquatic Biodiversity in Makurdi Metropolis, Nigeria. *Sustainable Biodiversity and Conservation*. 2024;3(3):15–28. <https://doi.org/10.5281/zenodo1399659>
- [30] Shandu ID, Xulu S, Gebreslasie M. Enhancing land cover classification in the heterogeneous landscape by integrating auxiliary data with Sentinel-2 imagery using the random forest algorithm. *Frontiers in Remote Sensing*. 2025;6:1697897. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1697897>
- [31] Alegbeleye OM, Rotimi YO, Shomide P, Oyediran A, Ogundipe O, Akintunde-Alo A. Land use land cover (LULC) analysis in Nigeria: a systematic review of data, methods,

- and platforms with future prospects. *Bulletin of the National Research Centre*. 2024;48(1):127. <https://doi.org/10.1186/s42269-024-01286-z> EDN: ZIPXMS
- [32] Faisal Koko A, Yue W, Abdullahi Abubakar G, Hamed R, Noman Alabsi AA. Analyzing urban growth and land cover change scenario in Lagos, Nigeria using multi-temporal remote sensing data and GIS to mitigate flooding. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2021;12(1):631–652. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1887940> EDN: MIOLAU
- [33] Mulatu K, Hundera K, Senbeta F. Analysis of land use/land cover changes and landscape fragmentation in the Baro-Akobo Basin, Southwestern Ethiopia. *Heliyon*. 2024;10(7):e28378. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28378> EDN: EOWMLM
- [34] Sohl T, Dornbierer J, Wika S, Robison C. Remote sensing as the foundation for high-resolution United States landscape projections — The Land Change Monitoring, assessment, and projection (LCMAP) initiative. *Environmental Modelling and Software*. 2019;120:104495. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104495> EDN: FWNEDJ
- [35] Zhai Ge, Zhang M, Hu Y, Chen Yu, Wu C, Lu Y, He T. Nighttime light metrics for analysing urban-rural economic disparities: A case study in 36 Chinese metropolitan areas. *Cities*. 2025;162:105930. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105930> EDN: ZGYORW
- [36] Zhang Xu, Arellano B, Roca J. Delineating urban boundaries by integrating nighttime light data and spectral indices. *Geographies*. 2025;5(3):49. <https://doi.org/10.3390/geographies5030049> EDN: VDHA EY
- [37] Liu M, Li R, Li Y, AL-Mowallad EAMS, Wu Ch, Wang W. Nighttime light intensity and brightness suitability in urban functional zones. 2025;15:25113. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10378-3> EDN: MYWYDE
- [38] He Ya, Wen C, Fang X, Sun X. Impacts of urban-rural integration on landscape patterns and their implications for landscape sustainability: The case of Changsha, China. *Landscape Ecology*. 2024;39:129. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01926-9> EDN: DAZRIW
- [39] McGarigal K, Marks BJ. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *General Technical Report PNW-GTR-351*. Portland: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station; 1995. 122 p. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>
- [40] Cushman SA, McGarigal K. Landscape metrics, scales of resolution. In: von Gadow K, Pukkala T, editors. *Designing Green Landscapes. Managing Forest Ecosystems*. Vol 15. Springer, Dordrecht; 2008. p. 33–51. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6759-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6759-4_2)
- [41] Akpu B, Tanko AI, Jeb DN, Dogo B. Geospatial Analysis of Urban Expansion and Its Impact on Vegetation Cover in Kaduna Metropolis, Nigeria. *Asian Journal of Environment and Ecology*. 2017;3(2):1–11. <https://doi.org/10.9734/AJEF/2016/31149>
- [42] Agbelade AD. Analyzing the influence of urban vegetation cover on land surface temperature in Southwestern Nigeria. *Discover Environment*. 2025;3(1):10. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00186-x> EDN: DOYOTF
- [43] Obateru RO, Okhimamhe AA, Fashae OA. Insights into landscape structure change in urbanising rainforest and Guinea savanna ecological regions of Nigeria. *Environmental Management*. 2025;75:1216–1238. <https://doi.org/10.1007/s00267-025-02118-0>
- [44] Luo M, Zhou Yu, Sultan MS, Hakimjon H, Yu Ya. Spatiotemporal dynamics and driving factors of the coupling relationship between regional urban development and green space ecological quality. *Ecological Indicators*. 2025;179:114009. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114009> EDN: VFBVMK

- [45] Musa J, Samuel HS, Rickson NH, Sunday EE. Sustainable smart urban form: integration of green spaces and ecosystem services in developing cities of Nigeria. *Journal of Engineering and Industrial Research*. 2025;6(2). <https://doi.org/10.48309/JEIRES.2025.504310.1158>
- [46] Sun Q, Li D, Tang X, Ren Yu. Vegetation-specific cooling responses to compact urban development: evidence from a landscape-based analysis in Nanjing, China. *Plants*. 2025;14(16):2457. <https://doi.org/10.3390/plants14162457> EDN: GUTUQX
- [47] Fang H, Sha M, Lin W, Qiu D, Sha Z. Assessing urban greenness fragmentation and analysis of its associated factors: a case study in wuhan metropolitan area, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021;10(11):760. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110760> EDN: IBDAHR
- [48] Zhang Yu, Wang Yu, Ding N. Spatial Effects of Landscape Patterns of Urban Patches with Different Vegetation Fractions on Urban Thermal Environment. *Remote Sensing*. 2022;14(22):5684. <https://doi.org/10.3390/rs14225684> EDN: CPQRID
- [49] Zhang J, Wang P, Jin A. Multidimensional characteristics of urban green space and its impact in mitigating urban heat Island effects: a case study of Guangzhou. *Scientific Reports*. 2025;15:39959. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23773-7> EDN: PPEVZX
- [50] Wang S, Wu M, Hu M, Fan Ch, Wang T, Xia B. Promoting landscape connectivity of highly urbanized area: an ecological network approach. *Ecological Indicators*. 2021;125:107487. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107487> EDN: WAAMLW
- [51] Kim KH, Park M, Park T, Baek D, Kim G, Heo N, Chun DJ. Spatial heterogeneity patterns along the human footprint gradient and their ecological implications: a case study in South Korea. *Ecological Indicators*. 2025;177:113771. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113771> EDN: TGGFCF
- [52] Jiang Y, Zhou L., Wang B., Zhang Q, Gao H, Wang S, & Cui M. The impact of gradient expansion of urban–rural construction land on landscape fragmentation in typical mountain cities, China. *International Journal of Digital Earth*. 2024;17(1):2310093. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2310093> EDN: NRJKVV
- [53] Auffret AG, Plue J, Cousins SAO. The spatial and temporal components of functional connectivity in fragmented landscapes. *Ambio*. 2015;44(Suppl 1):51–59. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0588-6> EDN: CELHPD
- [54] Halder S, Banerjee S, Youssef YM, Mukhtar Z, Bhandari G, Alarifi N, Abd-Elmaboud ME, Aboelnour MA. Geospatial assessment of forest disturbance and sustainable development goals integration in dry deciduous landscapes using remote sensing and Google Earth Engine. *Geocarto International*. 2025;40(1):2567906. <https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2567906> EDN: JAAYJI
- [55] Zhang Q, Tang F, Chen H, Li F, Chen Zh, Jiao Ya. Assessing landscape fragmentation and ecological connectivity to support regional spatial planning: a case study of Jiangsu province, China. *Ecological Indicators*. 2024;162:112063. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112063> EDN: ZCFQHO
- [56] Satterthwaite D. The impact of urban development on risk in sub-Saharan Africa’s cities with a focus on small and intermediate urban centres. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2017;26:16–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.025>
- [57] Dos Santos S, Adams EA, Neville G, Wada Y, Sherbinin A, Mullin Bernhardt E, Adamo SB. Urban growth and water access in sub-Saharan Africa: Progress, challenges, and emerging research directions. *Science of the Total Environment*. 2017;607–608:497–508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.157>

- [58] Ahouandjinou SDITK, Sodalo C, Sambieni RK, Osseni AA, Akossou AYJ, Bogaert J. Built-up expansion and urban land use trade-offs in peri-urban Cotonou (Benin), West Africa: A scenario-based remote sensing approach. *City and Environment Interactions*. 2025;28:100263. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100263>
- [59] Maket I, Kanó IS, Vas Z. Quality of urban infrastructural service accessibility and human well-being in Sub-Saharan Africa. *World Development Sustainability*. 2024;4:100155. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2024.100155> EDN: KYKKWC

### **Bio notes:**

*Shaibu Ochoche*, Postgraduate student, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: shuaibu.ochoche@rudn.ru.

*Anatoly A. Kirichuk*, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Director of the Department of Human Ecology and Bioelementology, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5125-5116; eLIBRARY SPIN-code: 9483-2011. E-mail: kirichuk-aa@rudn.ru

### **Сведения об авторах:**

*Шаибу Очоче*, аспирант, институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, e-mail: shuaibu.ochoche@rudn.ru.

*Киричук Анатолий Александрович*, доктор биологических наук, доцент, директор департамента экологии человека и биоэлементологии, институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0001-5125-5116; eLIBRARY SPIN-код: 9483-2011. E-mail: kirichuk-aa@rudn.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-223-236

EDN: PMTVHG

УДК 598.2

Научная статья / Research article

## Эколого-географические исследования авифауны Алтая во второй половине XX века


А.В. Бондаренко<sup>1,2,3</sup>, В.В. Бондарь<sup>4</sup>, А.А. Бондаренко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт алтаистики им. С.С. Суразакова, Горно-Алтайск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный парк Сайлюгемский, с. Кош-Агач, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>4</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

<sup>5</sup>Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Российская Федерация  
 70.bondarenko@mail.ru

**Аннотация.** На кафедре зоологии, экологии и генетики Горно-Алтайского университета со второй половины XX столетия по настоящее время накоплен значительный объем сведений по фауне, численности, географическому распределению птиц Алтая. Выявлены важные закономерности формирования и динамика птиц за 100 лет, установлена зависимость от природных и биогенных факторов, богатство авифауны Алтая (379 видов) обусловлено разнообразием современных ландшафтов и сложностью геологической истории. Впервые в СССР на Алтае применена «Всесезонная количественная методика учета птиц». Представлен повидовой обзор птиц Северо-Восточного Алтая с анализом количественных характеристик пространственно-временных изменений их летней численности в конце 1990-х и сопоставление с аналогичными данными для начала 1960-х гг. Проведен эколого-географический анализ авифауны, установлены орнито-географические районы, выявлены сезонные аспекты и динамика, дана комплексная оценка населения птиц смешанных лесов Центрального Алтая. Приведена сезонная оценка авифауны в местообитаниях степного пояса Юго-Восточной провинции Алтая, а также характеристика численности видов и специфика летних орнитокомплексов.

**Ключевые слова:** Алтайская горная область, географический ареал, орнитогеографические районы, численность птиц

**Вклад авторов.** Бондаренко А.В. — написание статьи, редактирование. Бондарь В.В. — окончательная редакция. Бондаренко А.А. — набор текста, работа с источниками, оформление текста в соответствии с требованиями. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Бондаренко А.В., Бондарь В.В., Бондаренко А.А., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Финансирование.** Исследование выполнено по проекту «История Горного Алтая XX века в портретах выдающихся личностей» в Научно-исследовательском институте им. С.С. Суразакова, г. Горно-Алтайск, Республика Алтай, а также в рамках Президентского фонда «Природа»: ЭКО-25-2-001377 «В поисках призрака гор: исследование снежного барса на Южно-Чуйском хребте, Республика Алтай» и ЭКО-26-2-00-1808 «Сохраним аргали в Юго-Восточном Алтае».

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**История статьи:** поступила в редакцию 12.09.2025; доработана после рецензирования 24.10.2025; принята к публикации 02.02.2026

**Для цитирования:** *Бондаренко А.В., Бондарь В.В., Бондаренко А.А.* Эколого-географические исследования авифауны Алтая во второй половине XX века // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 223–236. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-223-236>  
EDN: PMTVHG

## Ecological and geographical studies of the Altai avifauna in the second morning of the 20th century

Alexey V. Bondarenko<sup>1,2,3</sup>  , Vladimir V. Bondar<sup>4</sup>, Alexey A. Bondarenko<sup>5</sup> 

<sup>1</sup>*S.S. Surazakov Research Institute of Altaic Studies, Gorno-Altai, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Saylyugemsky National Park, Kosh-Agach, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Institute of Animal Taxonomy and Ecology SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>4</sup>*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

<sup>5</sup>*Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russian Federation*

 70.bondarenko@mail.ru

**Abstract.** Since the second half of the 20th century, the Department of Zoology, Ecology and Genetics of the Gorno-Altai University has accumulated a significant amount of information on the fauna, abundance and geographical distribution of birds of Altai. Important patterns of formation and dynamics of birds over 100 years have been revealed, the dependence on natural and biogenic factors has been established, the richness of the Altai avifauna (379 species) is due to the diversity of modern landscapes and the complexity of geological history. For the first time in the USSR, the “All-season quantitative method of bird census” was applied in Altai. A species-by-species review of birds of the North-Eastern Altai is presented with an analysis of the quantitative characteristics of spatio-temporal changes in their summer numbers in the late 1990s and a comparison with similar data for the early 1960s. An ecological and geographical analysis of the avifauna was carried out, ornithogeographic regions were established, seasonal aspects and dynamics were revealed, and a comprehensive assessment of the bird population of

mixed forests of the Central Altai was given. A seasonal assessment of the avifauna in the habitats of the steppe belt of the South-Eastern province of Altai is given, the characteristics of species population and the specifics of summer ornithocomplexes are presented.

**Keywords:** Altai mountain region, geographical range, ornithogeographic regions, bird population

**Authors' contribution.** *A.V. Bondarenko* — article writing, editing. *V.V. Bondar* — final editing. *A.A. Bondarenko* — text typesetting, work with sources, text formatting in accordance with requirements. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Funding.** The research was carried out within the framework of the project “History of Gorny Altai in the 20th Century in the Portraits of Prominent Figures” at the S.S. Surazakov Research Institute, Gorno-Altai, the Altai Republic, as well as under the Presidential Foundation “Nature” grants: ECO-25-2-001377 “In Search of the Mountain Ghost: A Study of the Snow Leopard on the Yuzhno-Chuysky Ridge, Altai Republic” and ECO-26-2-00-1808 “Let’s Preserve the Argali in Southeastern Altai.”

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Data availability statement.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history:** received 12.09.2025; revised 24.10.2025; accepted 02.02.2026.

**For citation:** Bondarenko AV, Bondar VV, Bondarenko AA. Ecological and geographical studies of the Altai avifauna in the second morning of the 20th century. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):223–236. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-223-236> EDN: PMTVHG

## Введение

Горная система Алтай расположена на юге Западной Сибири (координаты: 48° и 53° с.ш., 81° и 90° в.д.), занимает площадь — 185 тыс. км<sup>2</sup> и представляет собой наиболее высокое звено в системе гор Южной Сибири. Границы Алтая на северо-западе и севере соприкасаются с Западно-Сибирской равниной на высоте 300–500 м над уровнем моря. На северо-востоке, востоке и юге веерообразные хребты Алтая граничат с Кузнецко-Салаирской, Саянской, Тувинской областями Алтае-Саянской физико-географической страны и примыкают к хребту Монгольский Алтай. Юго-западная граница проходит прямо по тектоническому разлому Южного Алтая и Зайсанской котловины, у Прииртышской котловины происходит смыкание западных хребтов Алтая. Рельеф характеризуется чередованием долинных и межгорно-котловинных высокогорных степей: Курайская, Чуйская, Джулукульская, Катандинская, Уймонская, Урсульская и др., а также плоскогорьями: Укок, Улаганское и Чулышманское нагорье [1].

Высотно-пооясная структура Алтая и разнообразие ландшафтов способствовали формированию уникальных высокогорных орнитокомплексов, что

всегда привлекало внимание орнитологов с давних времен и до настоящего времени. Ранние исследования нашли свое отражение в литературе<sup>1</sup> [2].

Горный Алтай исследовали многие поколения ученых, и впоследствии он признан наиболее изученной территорией бывшего СССР. После выхода фундаментальной сводки П.П. Сушкина [2] специалистами было издано более 100 публикаций по фауне, экологии птиц Алтая, которые существенно дополнили сведения о географическом распространении видов на провинциальном уровне.

Многолетние исследования целенаправленно велись с 1980 г., но уже по отдельным физико-географическим провинциям Алтая: Юго-Восточный Алтай — Э.А. Ирисов [3], Центральный Алтай — Н.П. Малков [4], Западный Алтай — Б.В. Щербаков [5], Северо-Восточный, Восточный, включая бассейн Телецкого озера, — В.А. Стахеев [6], впоследствии вышеперечисленными специалистами успешно были защищены кандидатские диссертации на базе диссертационных советов МГУ, МГПИ им. В.И. Ленина и МГПИ им. Н.К. Крупской. Затем выходит в свет монография С. Эрнста по авифауне Восточного и Юго-Восточного Алтая [7]. Итоги эколого-фаунистических исследований нашли свое отражение в двух томах «Птицы Алтая» А.П. Кучина [8; 9]. Подробная фаунистическая сводка птиц и орнито-географическое районирование Южной Палеарктики представлены в монографии Р.Л. Беме [10].

В целом орнитофауна изучена достаточно полно, хотя сведений о населении птиц Алтая, их запасах численности и пространственно-типологическом распространении видов до конца XX столетия не было. До 1960-х гг. орнито-географические исследования количественными методами учета численности видов на Алтае не осуществлялись. Следует отметить, что на тот период времени самым изученным в этом аспекте следует признать Северо-Восточную провинцию Алтая [11]. Юрий Соломонович Равкин — первым апробировал и внедрил в практику количественный метод учета численности птиц. Через 40 лет, по его замыслу, коллегами повторно были проведены учеты по тем же маршрутам и местообитаниям с целью анализа произошедших изменений в динамике населения птиц [12].

И только, по прошествии 50 лет исследований, в 2009 г. опубликована монография Сергея Михайловича Цыбулина — Птицы Алтая: пространственно-временная дифференциация, структура и организация населения, в которой впервые представлен комплексный анализ населения птиц Алтайской горной области в целом. Автором было установлено, что из 381 вида, зарегистрированного за все годы исследований на Алтае, в состав населения птиц входит только 291 вид. Также достоверно определено обитание 272 видов

<sup>1</sup> Колосов А.М. История фаунистических исследований Алтая // Труды Алтайского заповедника / под общ. ред. проф. В.Г. Гептнера. Вып. 1. Б. и., 1938. С. 327–390.

в весенне-летний период, 263 вида — в летне-осенний, зимний — 99 видов соответственно [13].

В 2013 г. опубликована еще одна монография Е.Н. Бочкаревой, С.Г. Ливанова «Птицы Центрального Алтая: численность, распределение и пространственно-временная дифференциация населения» [14], в нее вошли материалы Н.П. Малкова. Детально представлен повидовой обзор птиц (286 видов), количественная характеристика территориальных изменений их летней и зимней численности, предложены иерархические классификации, отражающие особенности пространственного распределения и характера пребывания видов.

Изученность населения птиц в Западном и Северном Алтае, за исключением зимних и осенних сообществ<sup>2</sup>, следует считать наиболее низкой, так же как и Восточного Алтая, за исключением зимних орнитокомплексов [16].

*Цель исследования* — эколого-географический анализ авифауны в различных физико-географических провинциях Алтая; оценка вклада ученых в орнитологические исследования второй половины XX столетия.

## Материалы и методы

А.П. Кучин проводил исследования на Алтае и прилегающих равнинах в течение 50 лет (1954–2003 гг.): в Благовещенском заказнике на Кулундинском озере (1986–1993 гг.), в Верхобском заказнике (1971–1991 гг.), бассейнах рр. Бия и Катунь (1960–1984 гг.), Бие-Чумышской лесостепи (1964–2003 гг.), на Семинском перевале (1971–1989 гг.), в бассейне Телецкого озера, бассейнах рр. Бия и Лебедь (1977–1990 гг.), Урсульской, Усть-Канской (1976–1989; 1964–1987 гг.), Уймонской, Катандинской и Чуйской котловинах (1971–1999 гг.). За весь период автором проведено 62 экспедиции на 14 стационарных и 10 полустационарных участках. Исследовал более 3 тысяч гнезд 143 видов: более 1,5 тыс. — отряд воробьинообразные, более 500 — отряд соколообразные и отряд совы, более 600 — околородных и водоплавающих птиц. Окольцевал около 2000 особей птиц. В работе автор использовал данные Алтайского отдела РГО (1886–2003 гг.), Алтайской фенологической комиссии, личные полувековые фенологические наблюдения (1954–2003 гг.). Применял общепринятые методики зоологических исследований (см. [17–18]). Названия птиц были приведены согласно систематическому каталогу Л.С. Степанян «Конспект орнитологической фауны СССР [19].

Ю.С. Равкин более 10 лет (1960–1970 гг.) проводил исследования населения птиц в Северо-Восточной провинции Алтая в предгорных, низкогорных ландшафтных урочищах и антропогенных застроек, таких как п. Нижняя Ненинка — п. Сайдып — п. Верх-Бийск — п. Кебезень — п. Суучак Турочакского района Горно-Алтайской автономной области, а также бассейн оз. Телецкое

<sup>2</sup> См.: *Цыбулин С.М.* Количественная характеристика осеннего населения птиц Западного Алтая // Вопросы охраны природы Горного Алтая. Горно-Алтайск, 1976. С. 46–50; [15].

и р. Бия с многочисленными ее притоками. В соответствии с авторской методикой учеты ежегодно проводились в установленное время (16 мая — 31 августа), причем учетный маршрут — 5 км каждый. В целом автором исследовано 36 разнородных местообитаний 5 высотных поясов, на маршрутах более 1600 км.

Достоверно установлено обитание 213 видов. В своей работе автор использовал градацию типов фауны Б.К. Штегмана<sup>3</sup>, Каталог птиц СССР — А.Н. Иванов<sup>4</sup>.

При камеральной обработке полевого материала расчеты проведены с помощью специально разработанных компьютерных программ лаборатории зоомониторинга ИСиЭЖ СО РАН г. Новосибирск. Статистика рассчитывалась в соответствии с утвержденными методическими рекомендациями<sup>5</sup>, пространственно-типологическая структура, организация населения видов птиц — методом кластерного и факторного анализа [20].

Н.П. Малков занимался изучением птиц Центрального (1970–1980 гг.) и Юго-Восточного Алтая (1980–2000 г.). В Центральном Алтае исследовал хребты: Семинский, Катунский, Теректинский и Айгулакский. Межгорные котловины: Усть-Канскую с прилегающими хребтами, Уймонскую, Катандинскую, Теректинскую и Ининскую. В Юго-Восточном Алтае: Чуйскую степь, хребты: Сайлюгем, Северо-Чуйский, Южно-Чуйский, плоскогорье Укок, Курайскую степь и Курайский хребет. Общий объем пеших учетных маршрутов составил 1100 км. Достоверно установлено обитание 256 видов. Автор использовал в работе методику учета на маршрутах [17]. При камеральной обработке применял следующую шкалу обилия птиц в местообитаниях (на суши — особей на 1 км<sup>2</sup>, в водно-околоводных местообитаниях — особей на 10 км береговой линии). Видовые названия птиц даны по А.Н. Иванову «Каталог птиц СССР»<sup>6</sup>.

## Результаты и обсуждение

Авторы орнитологических исследований жили и работали в годы Великой Отечественной войны и сложные годы восстановления промышленности и в целом народного хозяйства СССР. В конце XX в. (1980–1990 гг.) в академической науке и вузовской системе — Высшей школе ученые невольно стали участниками перемен в научной и образовательной деятельности, ориентированной на рыночную экономику в стране, продолжая при этом достойно

<sup>3</sup> Штегман Б.К. Основы орнитогеографического деления Палеарктики // Новая серия. Фауна СССР. Птицы. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1938. Т. 1. Вып. 2. 164 с. (Новая серия. Фауна СССР. Птицы).

<sup>4</sup> Иванов А.Н. Каталог птиц СССР. Ленинград: Наука, 1976. 275 с.

<sup>5</sup> Равкин Ю.С., Челинцев Н.Г. Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. Москва: ВНИИИприроды, 1990. 33 с.

<sup>6</sup> Иванов А.Н. Каталог птиц СССР. Ленинград: Наука, 1976. 275 с.

трудиться во благо общества и Российской Федерации в целом. Это образец самоотверженного служения ученых-орнитологов интересам своего отечества, своего народа, пример стойкости и выдержки в трудных жизненных условиях.

В статье речь пойдет об орнитологах, трудившихся в разные годы и в разных должностях на кафедре зоологии (до 1987 г.), зоологии, экологии и генетики (в 1987–2014 гг.), в ФГБУ ВО «Горно-Алтайский государственный университет». А.П. Кучин — доктор биологических наук, профессор (стаж — 45 лет, 1963–2008 гг.), читал лекции и вел лабораторно-практические занятия и полевые практики. Являлся заместителем декана естественно-географического факультета (1967–1968 гг.), заведующим кафедрой зоологии (1968; 1986–1994 гг.), проректором по научной работе (1968–1971 гг.), профессором кафедры зоологии, экологии и генетики (1987–2008 гг.). Ю.С. Равкин — доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией зоомониторинга ИСиЭЖ СО РАН, один из основателей открытия аспирантуры на кафедре зоологии, экологии и генетики Горно-Алтайского университета (стаж — 12 лет, 1993–2005 гг.). Н.П. Малков — кандидат биологических наук, доцент (стаж — 55 лет, 1967–2022 гг.). Читал курсы лекций по зоогеографии, общей экологии, биогеографии, социальной экологии, биологии низших и высших позвоночных животных, теории зоологической систематики. В 1982–1986 гг. заведовал кафедрой зоологии Горно-Алтайского государственного педагогического института<sup>7</sup>.

**Алексей Петрович Кучин** выявил важные закономерности формирования и динамики птиц Алтая за 100 лет, установил зависимость от природных и биогенных факторов. Наиболее существенным результатом Алексея Петровича является уникальная сводка по орнитофауне (повидовые очерки 379 видов — 18 отрядов, 36 семейств) и зоогеографии, основанной на фундаментальных личных материалах, собранных на протяжении 43 лет. Констатировал, что богатство авифауны Алтая обусловлено разнообразием современных ландшафтов и сложностью геологической истории, которая превратила Алтай в главный зоогеографический узел Палеарктики. Автором выявлены новые закономерности, касающиеся расширения либо сокращения ареалов и численности ряда птиц. Проведен анализ в связи с многолетними колебаниями климата. Фауна гнездящихся птиц Алтая за последние 100 лет увеличилась в результате спонтанного расселения двух десятков видов: западно-палеарктических (обыкновенный ремез, стенолаз, пеночка-трещотка, зяблик, коноплянка, чиж), юго-восточных палеарктических (хохлатый осоед, малая пестрогрудка, таежный сверчок, толстоклювая камышевка, пестрый дрозд) и монгольских (хохлатый и монгольский жаворонки). Расширили свои границы еще 50 видов,

<sup>7</sup> История кафедры зоологии Горно-Алтайского университета. Хроника от момента зарождения до... (1949 г. — 1 июля 2014 г.) / сост. А.В. Бондаренко, Н.П. Малков, В.М. Муравьева, О.В. Сафронова; отв. ред. А.В. Бондаренко. Бийск: Матрица, 2022. 165 с.

ранее обитающие на Алтае. Обобщения, сделанные автором по динамике фауны птиц за последнее столетие, являются уникальными не только для Сибири, но и для Палеарктики в целом. Впервые им представлены особенности формирования и становления зимних орнитокомплексов Алтая. Установлено, что в связи с разнообразием среды обитания хорошими кормовыми и защитными условиями наиболее богата и разнообразна зимняя орнитофауна Северо-Восточного и Центрального Алтая. Видовая и пространственная структура зимних орнитокомплексов беднее в Северо-Западном Алтае. Фауна птиц Юго-Восточного Алтая на открытых участках долин, куда спускаются на зимовку высокогорные виды, колеблется по годам в зависимости от высоты снежного покрова и его сохранности. В предальтайских равнинах большая часть зимующих видов сосредоточена в антропогенных ландшафтах. Ученый разработал оригинальное зоогеографическое районирование птиц Алтая, внес корректировку в районирование академика П.П. Сушкина, сделанное в начале столетия. Разработал практические рекомендации по охране редких и важных в практическом отношении видов и групп птиц. В целом Алексеем Петровичем сделаны фундаментальные научные обобщения, позволившие создать основу для охраны и рационального использования птиц Алтая, выявлены новые закономерности, позволяющие прогнозировать динамику фауны и населения птиц в условиях алтайской горной тайги и равнин степного Алтая. Он успешно защитил кандидатскую диссертацию «Дневные хищные птицы и совы Верхнего Приобья» в Ленинградском педагогическом университете им. А.И. Герцена в 1967 г., через 30 лет, в 1997 г., — докторскую диссертацию в диссертационном совете Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова: Птицы Алтая и прилегающих равнин (фауна, ее динамика за последние 100 лет и проблемы охраны). Автор целого ряда монографий: «Птицы Алтая: не воробьиные», «Птицы Алтая: воробьиные», «Птицы Алтая», «Природа и авифауна Алтая и их динамика в двадцатом столетии» [8; 9; 21], автор и соавтор 270 научных публикаций. В журнале «Орнитология» назван «Патриархом алтайской орнитологии».

Юрий Соломонович Равкин в 1960 г. инициировал исследования на Алтае в предгорной его части в рамках государственного задания Института экспериментальной биологии и медицины СО АН СССР. В результате изучения населения птиц Северо-Восточного Алтая автором достоверно установлены следующие типы фаун в разрезе высотных поясов в летне-осенний период: сибирско-европейская (предгорные ландшафты), европейско-сибирская (горные ландшафты), тибетско-сибирская (каменистые тундры), европейского типа (в антропогенных застройках, поселки), сибирского типа (на водоемах), причем в зимнее время наблюдается рост численности сибирских видов.

С увеличением абсолютной высоты местности над уровнем от предгорной лесостепи до низкогорной черневой тайги такие показатели, как плотность населения птиц, его суммарная биомасса и разнообразие фонового состава, воз-

растают и затем столь же последовательно уменьшаются к высокогорьям гольцово-предгольцового пояса. Как установлено, причина таких изменений кроется в ухудшении гидротермического режима, что и предопределяет общее богатство биоценозов и в целом всего населения птиц. Фаунистический состав по высотным поясам меняется и напрямую коррелирует с ландшафтом: чем разнообразнее урочища в ландшафте, тем разнообразнее списочный состав и население птиц в целом. Зимой концентрация птиц наблюдается в среднегорьях черневой тайги. С изменением доли хвойных лесообразующих пород снижается и общее обилие птиц. Не совпадают сроки прилета, пролета, гнездования и послегнездовых миграций у разных видов, соответственно, по жизненным циклам даже доминирующих видов нельзя провести четкие границы между отдельными сезонами.

Различается и сезонная динамика населения птиц в ландшафтных урочищах, автором выделено три типа динамики: эмиграционный, иммиграционный и динамически уравновешенный.

Причем в предгорных ландшафтах плотность населения динамически уравновешенного типа, а вот для низкогорных ландшафтов свойствен иммиграционный тип. В высокогорных и среднегорных ландшафтах наблюдаются эмиграционный и динамически уравновешенный типы динамики. В целом виды строго специфичны для ландшафтов и высотных поясов. Трансгрессия в их распространении настолько значима, что ни в пространстве, ни во времени невозможно провести географические границы, основываясь на особенностях размещения отдельных видов.

Многолетние исследования автора позволили выделить и описать три системы населения птиц: естественных ландшафтов суши, поселков или антропогенных застроек и водоемов. Причем население птиц вышеуказанных систем отличается друг от друга, а высотная поясность систем в целом совпадает. Установлена взаимосвязь непрерывности населения птиц и связанная с ней трансгрессия их распространения — причина динамической стабильности биоценозов. Пространственное, временное и функциональное разграничение не способствует устойчивости ценозов, вследствие выпадения отдельных звеньев сказывается на благополучии системы в целом [11].

По прошествии 40 лет, по замыслу Ю.С. Равкина, коллегами повторно были проведены учеты по тем же маршрутам и местообитаниям с целью анализа произошедших изменений в населении птиц. Установлен видовой состав и представлены по видовому обзору птиц (213 видов) Северо-Восточного Алтая с анализом количественных характеристик пространственно-временных изменений их летней численности в конце 1990-х гг., а также сопоставление с аналогичными данными для начала 1960-х гг. Проведено сравнение количественных показателей численности, видового богатства, биомассы, количества трансформируемой энергии и фаунистического состава населения птиц в различных местообитаниях в разрезе высотных поясов Северо-Восточной провинции Алтая [12].

Юрий Соломонович — автор «Всесезонной методики учета птиц». Методика высоко оценена, широко использовалась орнитологами бывшего Советского Союза, широко применяется и современными исследователями. Достоинство методики связано с простотой, минимальными затратами на подготовку, универсальностью и всеобщностью [17]. Многолетний полевой материал, собранный автором, позволил ему в 1966 г. защитить кандидатскую диссертацию по теме «Структура населения птиц Северо-Восточного Алтая», а впоследствии и докторскую диссертацию на основе изучения позвоночных животных Западной и Средней Сибири, включая горы ее южной части. Ю.С. Равкин — автор и разработчик географического мониторинга животного населения и факторной зоогеографии. В 1981 г. организовал первый в СССР «Банк данных коллективного пользования по животному миру Северной Евразии», который на настоящий момент времени включает в себя более 21 млн различных показателей численности видов наземных позвоночных и беспозвоночных животных. Полученный опыт и знания позволили Ю.С. Равкину с соавторами впервые для Северной Евразии оценить численность птиц и ее динамику за последние 50 лет — XX и начала XI в. [22]. Автор и соавтор 50 монографий, из них наиболее значимые — «Птицы Северо-Восточного Алтая», «География позвоночных южной тайги Западной Сибири», «Птицы лесной зоны Приобья», «Пространственная организация населения птиц лесной зоны», «Птицы равнин Северной Евразии» и др., автор и соавтор более 300 научных статей.

**Николай Петрович Малков** изначально занимался изучением населения птиц Центрального Алтая. На основе многолетних полевых исследований провел эколого-географический анализ авифауны Центрального Алтая, впервые установил четыре самостоятельных орнитогеографических района: северный (Семинский хребет), западный (Усть-Канская котловина с прилегающими хребтами), Центральный (Катунский, Теректинский хребты, Уймонская, Катандинская и Теректинская котловины) и Восточный (Ининская котловина, отроги Айгулакского и Теректинского хребтов). Выявил сезонные аспекты и динамику, дал комплексную оценку населения птиц смешанных лесов Центрального Алтая. Установил, что все орнитокомплексы подчинены высотной поясности и составу населения, делятся на три вида: лесостепной, лесной и высокогорный. Основная часть опубликованных материалов содержится в обзорной статье, где приведены результаты детального анализа населения птиц смешанных лесов Центрального Алтая [23].

Юго-Восточный Алтай как одна из высокогорных провинций Горного Алтая также подлежит вниманию и изучению орнитологов. Так, Н.П. Малковым и сыном Владимиром Николаевичем Малковым изучено летнее и зимнее население птиц в аридных местообитаниях степного и альпийско-тундрового поясов. Впервые для этой высокогорной территории дана оценка количественных показателей численности видов, выявлена внутривинциальная специфика летнего населения птиц. Описана сезонная динамика орнитокомп-

лексов степного пояса, составлен аннотированный список орнитофауны высокогорной провинции Алтая, включающий 256 видов [24]. Особо ценными являются оригинальные сведения по населению птиц по показателям численности: Чуйской степи, хребта Сайлюгем, Северо-Чуйского, Южно-Чуйского хребтов, плоскогорья Укок, Уландрыкской впадины, Курайской степи и Курайского хребта.

Николай Петрович Малков в 1982 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию «Эколого-географический анализ авифауны Центрального Алтая» под научным руководством Р.Л. Бёме — доктора биологических наук, профессора, известного орнитолога Советского союза в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова. Н.П. Малков — соавтор 10 монографий, автор и соавтор более 300 научных и научно-методических публикаций. Главный редактор Красных книг Республики Алтай (1-е и 2-е издание, 1996; 2007). Член правительственной комиссии Республики Алтай по рациональному использованию природных ресурсов, член общественно-консультативного совета по вопросам охраны природы и природопользования при прокуратуре Республики Алтай, почетный член Росохотрыболовсоюза. Эксперт по охотничьим трофеям и породам охотничьих собак. Организатор, руководитель зоологического музея Горно-Алтайского государственного университета (1993–2022 г.), организатор и участник научных изысканий ГАГУ совместно с тремя университетами США в области экологических проблем в Республике Алтай, в штате Канзас<sup>8</sup>.

## Заключение

Таким образом, кафедра зоологии, экологии и генетики Горно-Алтайского университета стала центром притяжения исследователей орнитологов в Горном Алтае, которые активно вели свои изыскания во всех шести провинциях — на Северном, Северо-Восточном, Центральном, Восточном, Западном и Юго-Восточном Алтае, а также Кулундинской низменности и Бие-Чумышской возвышенности степного Алтая. Потребовалось более 60 лет для сбора и накопления значительных объемов сведений. Достоверно изучены фауна, биология и экология редких и исчезающих видов. Алтай стал первой экспериментальной площадкой для апробации количественных методов учетов в орнитологии в СССР, что позволило установить реальную численность видов, их географическое распределение на провинциальном и региональном уровне. Именно это обстоятельство дало возможность провести обобщенный анализ собранных материалов, дать комплексную оценку и характеристику Алтайской горной области в Алтае-Саянской физико-географической стране: в фаунистическом, эколого-географическом, пространственно-типологическом и других аспектах.

<sup>8</sup> История кафедры зоологии Горно-Алтайского университета. Хроника от момента зарождения до... (1949 г. — 1 июля 2014 г.) / сост. А.В. Бондаренко, Н.П. Малков, В.М. Муравьева, О.В. Сафронова; отв. ред. А.В. Бондаренко. Бийск: Матрица, 2022. 165 с.

## Список литературы

- [1] *Маринин А.М., Самойлова Г.С.* Физическая география Горного Алтая. Барнаул: БГПИ, 1987. 110 с.
- [2] *Сушкин П.П.* Птицы Советского Алтая и прилежащих частей Северо-Западной Монголии. Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1938. Т. 1. 320 с. ; Т. 2. 436 с.
- [3] *Ирисов Э.А.* Птицы Юго-Восточного Алтая : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 1971. 16 с.
- [4] *Малков Н.П.* Эколого-географический анализ авифауны Центрального Алтая : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.08. Москва, 1981. 20 с.
- [5] *Щербаков Б.В.* Птицы Западного Алтая : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 1986. 22 с.
- [6] *Стахеев В.А.* Фауна и экология птиц Алтайского заповедника : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 1984. 24 с.
- [7] *Ernst S.* Fünf Wochen im Altai // *Ornithol. Mitt.* 1991a. Bd 1, no. 43. S. 303–308.
- [8] *Кучин А.П.* Птицы Алтая (не воробьиные). Барнаул : Алтайское книжное издательство, 1976. 232 с.
- [9] *Кучин А.П.* Птицы Алтая (воробьиные). Барнаул : Алтайское книжное издательство, 1982. 206 с.
- [10] *Беме Р.Л.* Птицы гор Южной Палеарктики. Москва : Изд-во МГУ, 1975. 181 с.
- [11] *Равкин Ю.С.* Птицы Северо-Восточного Алтая. Новосибирск : Наука, 1973. 375 с.
- [12] *Торопов К.В., Граждан К.В.* Птицы Северо-Восточного Алтая: 40 лет спустя. Новосибирск : Наука-Центр, 2010. 394 с. EDN: WZFTRL
- [13] *Цыбулин С.М.* Птицы Алтая: пространственно-временная дифференциация, структура и организация населения. Новосибирск : Наука, 2009. 234 с.
- [14] *Бочкарева Е.Н., Ливанов С.Г.* Птицы Центрального Алтая: численность, распределение и пространственно-временная дифференциация населения : монография / отв. ред. Ю.С. Равкин. Новосибирск : Наука-Центр, 2013. 541 с.
- [15] *Цыбулин С.М.* Птицы Северного Алтая. Новосибирск: Наука, 1999. 519 с.
- [16] *Митрофанов О.Б.* Массив Талдуаир // Ключевые орнитологические территории России / под ред. Т.В. Свиридовой, В.А. Зубакина. Т. 2 : Ключевые орнитологические территории международного значения в Западной Сибири. Москва, 2006. С. 248.
- [17] *Равкин Ю.С.* К методике учета птиц лесных ландшафтов // *Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае.* Новосибирск, 1967. 66-75.
- [18] *Кузякин А.П.* Зоогеография СССР // *Ученые записки Московского областного педагогического института им. Н.К. Крупской.* Москва, 1962. Т. 109. Вып. 1. С. 3–182.
- [19] *Степанян Л.С.* Конспект орнитологической фауны СССР. Москва : Наука, 1990. 726 с. EDN: TKOUZB
- [20] *Трофимов В.А., Равкин Ю.С.* Экспресс-метод оценки связи пространственной неоднородности животного населения и факторов среды // *Количественные методы в экологии животных : сб. тез. докл. конф.* Ленинград : Зоол. ин-т, 1980. С. 113–155.
- [21] *Кучин А.П.* Птицы Алтая. 2-е изд., доп. Горно-Алтайск : ГУП Горно-Алтайская республиканская типография, 2004. 778 с.
- [22] *Равкин Е.С., Равкин Ю.С.* Птицы равнин Северной Евразии. Новосибирск : Наука, 2005. 304 с. EDN: WACWUN
- [23] *Малков Н.П.* Население птиц смешанных лесов Центрального Алтая // *Биологические науки* 1986. Вып. 2. С. 39-45.
- [24] *Малков В.Н., Малков Н.П., Грабовский М.А.* Особенности пространственно-временной организации летнего населения птиц некоторых ландшафтов Юго-Восточного Алтая // *Сибирский экологический журнал.* 1996. Т. 3. № 2. С. 121–129.

## References

- [1] Marinin AM, SamoiloVA GS. *Physical Geography of the Altai Mountains*. Barnaul: BSPI; 1987. 110 p. (In Russ.)
- [2] Sushkin PP. *Birds of the Soviet Altai and adjacent parts of Northwestern Mongolia*. Moscow; Leningrad: Izd-vo Akademii nauk SSSR; 1938. Vol. 1, 320 p.; Vol. 2, 436 p. (In Russ.)
- [3] Irisov EA. *Birds of Southeastern Altai [dissertation abstract]*. Tomsk; 1971. 16 p. (In Russ.)
- [4] Malkov NP. *Ecological and Geographical Analysis of the Avifauna of Central Altai [dissertation abstract]*. Moscow; 1981. 20 p. (In Russ.)
- [5] Shcherbakov BV. *Birds of Western Altai [dissertation abstract]*. Moscow; 1986. 22 p. (In Russ.)
- [6] Stakheev VA. *Fauna and Ecology of Birds of the Altai State Nature Reserve [dissertation abstract]*. Moscow; 1984. 24 p. (In Russ.)
- [7] Ernst S. Fünf Wochen im Altai. *Ornithologische Mitteilungen*. 1991a;43(1):303–308.
- [8] Kuchin AP. *Birds of Altai (Non-Passerines)*. Barnaul: Altaiskoe knizhnoe izdatelstvo; 1976. 232 p. (In Russ.)
- [9] Kuchin AP. *Birds of Altai (Passerines)*. Barnaul: Altaiskoe knizhnoe izdatelstvo; 1982. 206 p. (In Russ.)
- [10] Boehme RL. *Birds of the Mountains of the Southern Palearctic*. Moscow: MGU publ.; 1975. 182 p. (In Russ.)
- [11] Ravkin YS. *Birds of Northeastern Altai*. Novosibirsk: Nauka publ.; 1973. 375 p. (In Russ.)
- [12] Toropov KV, Grazhdan KV. *Birds of Northeastern Altai: 40 Years Later*. Novosibirsk: Nauka-Tsentr publ.; 2010. 394 p. (In Russ.) EDN: WZFTLR
- [13] Tsybulin SM. *Birds of Altai: Spatio-Temporal Differentiation, Structure and Organization of Populations*. Novosibirsk: Nauka publ.; 2009. 234 p. (In Russ.)
- [14] Bochkareva EN, Livanov SG. *Birds of Central Altai: Abundance, Distribution and Spatio-Temporal Differentiation of Populations*. Yu. S. Ravkin, editor. Novosibirsk: Nauka-Tsentr publ.; 2013. 544 p. (In Russ.)
- [15] Tsybulin SM. *Birds of Northern Altai*. Novosibirsk: Nauka publ.; 1999. 519 p. (In Russ.)
- [16] Mitrofanov OB, Talduair Massif. In: *Key Ornithological Territories of Russia*. T.V. Sviridova, V.A. Zubakina, editors. Vol. 2. Key Ornithological Territories of International Importance in Western Siberia. Moscow; 2006. p. 248. (In Russ.)
- [17] Ravkin YS. On the method of bird counting in forest landscapes. In: *Nature of Tick-Borne Encephalitis Foci in Altai*. Novosibirsk; 1967. p. 66–75. (In Russ.)
- [18] Kuzyakin AP. Zoogeography of the USSR. *Scientific Notes of the Krupskaya Moscow regional Pedagogical Institute*. Moscow; 1962;109(1):3–182. (In Russ.)
- [19] Stepanyan LS. *Conspectus of the Ornithological Fauna of the USSR*. Moscow: Nauka publ.; 1990. 726 p. (In Russ.) EDN: TKOUZB
- [20] Trofimov VA, Ravkin YuS. An express method for assessing the relationship between spatial heterogeneity of animal populations and environmental factors. In: *Quantitative Methods in Animal Ecology: sat. abstract report conf*. Leningrad: Zoological Institute publ.; 1980. p. 113–155. (In Russ.)
- [21] Kuchin AP. *Birds of Altai*. 2nd ed., expanded. Gorno-Altai: Gorno-Altayskaya respublikanskaya tipografiya; 2004. 778 p. (In Russ.)
- [22] Ravkin ES, Ravkin YuS. *Birds of north euroasian plains*. Novosibirsk: Nauka publ.; 2005. 304 p. (In Russ.) EDN: WACWUN
- [23] Malkov NP. Bird population of mixed forests in Central Altai. *Biological Sciences*. 1986;(2):39–45. (In Russ.)

- [24] Malkov VN, Malkov NP, Grabovsky MA. Features of the spatio-temporal organization of the summer bird population in some landscapes of Southeastern Altai. *Siberian Journal of Ecology*. 1996;3(2):121–129. (In Russ.)

### Сведения об авторах:

*Бондаренко Алексей Викторович* — доктор биологических наук, руководитель научно-информационного отдела, старший научный сотрудник НИИ алтаистики им. С.С. Суразакова, старший научный сотрудник отдела науки, туризма и рекреационной деятельности Национального парка «Сайлюгемский», старший научный сотрудник лаборатории зоомониторинга Института систематики и экологии животных СО РАН; Научно-исследовательский институт алтаистики им. С.С. Суразакова, Российская Федерация, 649000, Республика Алтай, г. Горно-Алтайск, ул. Социалистическая, д. 6; ФГБУ Национальный парк «Сайлюгемский», Российская Федерация, 649780, Республика Алтай, Кош-Агачский район, с. Кош-Агач, ул. Сайлюгемская, д. 1; Институт систематики и экологии животных СО РАН, Российская Федерация, 630091, г. Новосибирск, ул. Фрунзе, д. 11. ORCID: 0000-0002-0062-7239. E-mail: 70.bondarenko@mail.ru

*Бондарь Владимир Викторович* — кандидат экономических наук, начальник отдела внутреннего контроля финансового департамента, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: bondar\_vv@rudn.ru

*Бондаренко Алексей Алексеевич* — студент экономико-юридического факультета Горно-Алтайского государственного университета, направление подготовки «Прикладная информатика в экономике», Горно-Алтайский государственный университет, Российская Федерация, 649000, Республика Алтай, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, д. 1. ORCID: 0009-0002-8598-7811

### Bio notes:

*Alexey V. Bondarenko*, Doctor of Biological Sciences, Head of the Scientific Information Department, Senior Researcher at the S.S. Surazakov Altai Studies Research Institute; Senior Researcher, Department of Science, Tourism and Recreational Activities, Saylyugemsky National Park; Senior Researcher, Laboratory of Zoomonitoring, Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS), S.S. Surazakov Altai Studies Research Institute, 6 Sotsialisticheskaya St, Gorno-Altaiisk, 649000, Russian Federation; Saylyugemsky National Park, 1 Saylyugemskaya St, Kosh-Agach village, Kosh-Agachsky District, 649780, Altai Republic, Russian Federation; Institute of Systematics and Ecology of Animals SB RAS, 11 Frunze St, Novosibirsk, 630091, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0062-7239. E-mail: bondarenko70@mail.ru

*Vladimir V. Bondar*, Candidate of Economic Sciences (PhD in Economics), Head of the Internal Control Division, Financial Department, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: bondar\_vv@rudn.ru

*Aleksey A. Bondarenko*, Student, Faculty of Economics and Law, Gorno-Altaiisk State University, field of study “Applied Informatics in Economics”, Gorno-Altaiisk State University, 1 Lenkina St, Gorno-Altaiisk, 649000, Altai Republic, Russian Federation. ORCID: 0009-0002-8598-7811

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-237-244

EDN: PNEPQN

УДК 577.3:574.2:529.2:632.95

Научная статья / Research article

## Эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum*

О.Д. Калюжная<sup>ID</sup>✉, Г.В. Польшова<sup>ID</sup>*Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация*

✉ 1142240104@rudn.ru

**Аннотация.** Цель исследования — оценка механизмов воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum*. Проблема загрязнения гербицидами водных экосистем достаточно актуальна на сегодняшний день, так как данные вещества попадают с сельскохозяйственных угодий с грунтовыми водами и поверхностным смывом в водоёмы. Трифлуралин является широко используемым гербицидом, который может попадать в водные экосистемы и представлять угрозу для гидробионтов. В ходе эксперимента изучалось влияние трифлуралина в концентрациях: 1,0; 2,5; 5,0; 10,0 и 25,0 мг/л на выживаемость и скорость размножения инфузорий в течение 5 сут. Установлено, что трифлуралин оказывает статистически значимое дозозависимое токсическое действие на *P. caudatum*, начиная с концентрации 2,5 мг/л. При высоких концентрациях (10,0 и 25,0 мг/л) наблюдался эффект острой токсичности (гибель и снижение подвижности), а на 3–5-е сутки – подавление репродуктивной функции (цитостатический эффект). Концентрация 1,0 мг/л была признана недействующей, так как не вызвала статистически значимых отличий от контрольной группы. Результаты свидетельствуют о том, что механизм токсического действия трифлуралина на инфузорий может быть связан с ингибированием клеточного деления. Учитывая низкую растворимость и потенциальную стойкость трифлуралина в воде, его поступление в водоемы может представлять долговременную опасность для водных экосистем. Полученные результаты могут применяться для прогнозирования воздействия трифлуралина на структуру водных экосистем, где простейшие занимают ключевое положение в микробной петле и являются кормовой базой для многих гидробионтов.

**Ключевые слова:** Анонс к.э., гербициды, инфузории, токсическое действие, пороговая концентрация, выживаемость

**Вклад авторов.** *Калюжная О.Д.* — подготовка материалов, написание статьи. *Польшова Г.В.* — научное редактирование текста, консультация в формировании концепции исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Калюжная О.Д., Польшова Г.В., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**История статьи:** поступила в редакцию 12.09.2025; доработана после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 11.02.2026.

**Для цитирования:** Калюжная О.Д., Полюнова Г.В. Эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum* // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 237–244. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-237-244> EDN: PNEPQN

## Ecological and toxicological assessment of the effect of trifluralin on *Paramecium caudatum*

Olga D. Kalyuzhnaya  , Galina V. Polynova 

*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

 1142240104@pfur.ru

**Abstract.** The aim of this study is to assess the mechanisms of trifluralin's effect on *Paramecium caudatum*. The problem of herbicide pollution in aquatic ecosystems is highly relevant today, as these substances enter water bodies from agricultural lands via groundwater and surface runoff. Trifluralin is a widely used herbicide that can enter aquatic ecosystems and pose a threat to aquatic organisms. During the experiment, the effect of trifluralin at concentrations of 1,0; 2,5; 5,0; 10,0 and 25,0 mg/L on the survival and reproduction rate of ciliates was studied over 5 days. It was found that trifluralin exerts a statistically significant dose-dependent toxic effect on *P. caudatum*, starting from a concentration of 2,5 mg/L. At high concentrations (10,0 and 25,0 mg/L), acute toxicity effects (mortality and reduced motility) were observed, and on days 3–5, inhibition of reproductive function (a cytostatic effect) was noted. The concentration of 1,0 mg/L was considered non-effective, as it did not cause statistically significant differences compared to the control group. The results indicate that the mechanism of trifluralin's toxic action on ciliates may be associated with the inhibition of cell division. Given the low solubility and potential persistence of trifluralin in water, its entry into water bodies may pose a long-term hazard to aquatic ecosystems. The obtained results can be used to predict the impact of trifluralin on the structure of aquatic ecosystems, where protozoa occupy a key position in the microbial loop and serve as a food source for many aquatic organisms.

**Keywords:** Announcement c.e., herbicides, infusoria, toxic effect, threshold concentration, survival rate

**Authors' contribution.** *O.D. Kalyuzhnaya* — preparation of materials, writing of the article. *G.V. Polynova* — scientific editing of the text, consultation on the formation of the research concept. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Data availability statement.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history:** received 12.09.2025; revised 20.01.2026; accepted 11.02.2026.

**For citation:** Kalyuzhnaya OD, Polynova GV. Ecological and toxicological assessment of the effect of trifluralin on *Paramecium caudatum*. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):237–244. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-237-244>  
EDN: PNEPQN

## Введение

Гербициды используются в сельском хозяйстве для уничтожения сорной растительности [1]. Основными источниками попадания гербицидов в водные объекты являются сельскохозяйственные угодья, где они используются для защиты культур от сорных видов. С дождевыми и талыми водами гербициды переносятся в реки, озера и водохранилища [2]. Многие исследования подтверждают опасность гербицидов для водных экосистем [3; 4]. Стойкие гербициды способны накапливаться в организмах и передаваться по пищевой цепи, достигая высших трофических уровней [5].

Действующее вещество гербицида Анонс к.э. (концентрат эмульсии) — трифлуралин [6]. Трифлуралин — это селективный довсходовый динитроанилиновый гербицид, который широко используется для борьбы с однолетними злаковыми и широколиственными сорняками в полевых культурах, обладает высокой летучестью [7; 8].

*Paramecium caudatum* — одноклеточное ресничное простейшее, обитающее в пресноводных водоемах, легко культивируется в лабораторных условиях. Инфузории (*Paramecium caudatum*) широко используются при оценке токсичности химических веществ [9].

При исследовании воздействия гербицидного препарата Глайсель на инфузорий выявлено, что гербициды вызывают окислительный стресс и ингибирование резистентности у инфузорий, также наблюдались поведенческие изменения, такие как быстрое опорожнение пищевых вакуолей и потеря подвижности [10]. Несмотря на то, что действующее вещество многих гербицидных препаратов — диурон (токсичен для инфузорий только в высоких концентрациях), этот препарат в низких концентрациях может взаимодействовать с карбофураном и повышать его токсичность для инфузорий [11]. Доказано, что сульфонилмочевинные гербициды подавляют рост инфузорий [12]. Тем не менее бис-(2-этилгексил) фталат, дихромат калия, 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота и паракват стимулируют рост данных организмов [13].

Проведенный эксперимент позволил оценить токсикологическое воздействие трифлуралина на простейших и установить критические уровни загрязнения, что является основой для прогнозирования экологических последствий применения данного гербицида.

*Цель исследования* — эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на инфузорию *Paramecium caudatum*.

## Материалы и методы

Для изучения влияния препарата на выживаемость и размножение простейших в качестве тест-объекта использовали инфузорию-туфельку. Выбор данного вида обусловлен его высокой чувствительностью к токсическим веществам, быстрым темпом размножения, простотой культивирования в лабораторных условиях и статусом классического модельного объекта в эколого-токсикологических и гидробиологических исследованиях. Клеточная мембрана инфузории напрямую контактирует с окружающей средой, делая ее чрезвычайно чувствительной к малейшим изменениям химического состава воды и наличию токсикантов. Инфузория-туфелька упрощает исследование физиологических процессов и эффектов от таких загрязнителей, как минеральное масло, пестициды, металлы и др. [14].

В лаборатории центра «Аквакультуры» МГУТУ им. К.Г. Разумовского нами проводились опыты в течение 5 сут., что соответствует нескольким генерационным циклам инфузорий и позволяет оценить как кратковременные летальные эффекты (выживаемость), так и долговременное воздействие на популяцию (размножение). Все эксперименты были поставлены в 3-кратной повторности для обеспечения статистической достоверности получаемых результатов и минимизации влияния случайных погрешностей.

Исследованию подвергались растворы действующего вещества гербицида Анонс к.э. — трифлуралина, гербицида из класса динитроанилинов, широко применяемого в сельском хозяйстве. Были протестированы следующие концентрации: 1,0; 2,5; 5,0; 10,0 и 25,0 мг/л. В качестве контрольной группы использовались культуры инфузорий, помещенные в стандартную питательную среду без добавления токсиканта. Условия содержания тест-культур (температура, освещенность, аэрация, исходная плотность посадки организмов) стандартизированы и поддерживались постоянными на протяжении всего эксперимента<sup>1</sup>.

Ежедневно нами проводился отбор проб и подсчет количества особей в каждой повторности с помощью микроскопа. Регистрировались следующие показатели: выживаемость (%), скорость роста популяции и средняя плотность популяции.

Полученный цифровой материал проанализирован с использованием методов вариационной статистики. Для оценки достоверности различий между опытными и контрольными группами применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Уровень статистической значимости различий принимался при  $P < 0,05$ . На основании анализа установлены недействующая и пороговая концентрации.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57166–2016 Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий *Paramecium caudatum* — Введ. 2017-07-01. Москва : Стандартинформ, 2016. 17 с.

## Результаты

Результаты исследований по изучению токсического влияния гербицида Анонс к.э. на простейших представлены в таблице.

**Динамика численности (%) инфузорий *Paramecium caudatum* в растворах с различными концентрациями гербицида Анонс к. э., экспозиция 5 суток**

Концентрация, мг/л	Экспозиция, дни											
	1			2			4			5		
	* <i>M + m</i>	** <i>t<sub>st</sub></i>	%	<i>M + m</i>	<i>t<sub>st</sub></i>	%	<i>M + m</i>	<i>t<sub>st</sub></i>	%	<i>M + m</i>	<i>t<sub>st</sub></i>	%
Конт- роль	10,0 + 0,50	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100
1,0	10,0 + 0,50	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100
2,5	8,0 + 0,50	3,10	80	8,8 + 0,78	4,12	73	6,4 + 0,87	4,92	53	6,4 + 0,87	6,31	50
5,0	8,3 + 0,45	2,80	83	8,1 + 0,72	4,42	67	5,7 + 0,84	7,40	47	5,7 + 0,84	7,40	47
10,0	8,0 + 0,50	3,10	80	7,2 + 0,65	4,89	60	3,3 + 0,80	12,8	27	3,3 + 0,80	12,8	27
25,0	3,3 + 0,58	6,41	33	3,2 + 0,40	8,80	27	1,2 + 0,06	26,9	10	0 + 0,00	–	0

Примечание: \* *M + m* – средняя численность (экз.) и отклонение от средней; \*\* *t<sub>st</sub>* – достоверное отклонение от контроля (*t<sub>st</sub>* = 2,78, при *P* < 0,05).

Источник: составлено О.Д. Калюжной.

**Dynamics of the number (%) of *Paramecium caudatum* infusoria in solutions with different concentrations of herbicide Announcement c. e., exposure for 5 days**

Concentration, mg/l	Exposure, day											
	1			2			4			5		
	* <i>M + m</i>	** <i>t<sub>st</sub></i>	%	<i>M + m</i>	<i>t<sub>st</sub></i>	%	<i>M + m</i>	<i>t<sub>st</sub></i>	%	<i>M + m</i>	<i>t<sub>st</sub></i>	%
Control	10.0 + 0.50	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100
1.0	10.0 + 0.50	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100
2.5	8.0 + 0.50	3.10	80	8.8 + 0.78	4.12	73	6.4 + 0.87	4.92	53	6.4 + 0.87	6.31	50
5.0	8.3 + 0.45	2.80	83	8.1 + 0.72	4.42	67	5.7 + 0.84	7.40	47	5.7 + 0.84	7.40	47
10.0	8.0 + 0.50	3.10	80	7.2 + 0.65	4.89	60	3.3 + 0.80	12.8	27	3.3 + 0.80	12.8	27
25.0	3.3 + 0.58	6.41	33	3.2 + 0.40	8.80	27	1.2 + 0.06	26.9	10	0 + 0.00	–	0

Note: \* *M + m* average number (individuals) and deviation from the average; \*\* *t<sub>st</sub>* is a significant deviation from the control (*t<sub>st</sub>* = 2,78, at *P* < 0,05).

Source: compiled by O.D. Kalyuzhnaya.

Данные, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что статистически достоверные ( $P < 0,05$ ) отклонения от контроля по показателю численности популяции с первых по пятые сутки эксперимента зарегистрированы в растворах трифлуралина с концентрациями 2,5–25,0 мг/л. Степень угнетения популяции носила выраженный дозозависимый характер, варьируя от 20 % при минимальной концентрации в данном ряду (2,5 мг/л) до практически полного подавления роста культуры (100 %) при концентрации 25,0 мг/л.

В первые 24–48 ч в вариантах с высокими концентрациями (10,0 и 25,0 мг/л) мы наблюдали эффект острой токсичности, выразившийся в гибели части исходной популяции и резком снижении подвижности особей. На 3–5-е сутки действие препарата проявилось в подавлении репродуктивной функции: у выживших инфузорий было заторможено деление, что и привело к значительному отставанию в росте численности по сравнению с контролем. Это указывает на то, что трифлуралин оказывает не только летальное, но и мощное цитостатическое действие. В растворе с концентрацией препарата 1,0 мг/л численность парамеций на всех этапах наблюдения статистически не отличалась от контрольного варианта. Кривые роста популяции были практически идентичны, что указывает как на отсутствие негативного влияния на выживаемость, так и на репродуктивные способности инфузорий. Тем не менее в исследовании воздействия трифлуралина на *Paramecium tetraurelia* замечено подавление роста клеточной культуры (при тестировании в течение 24 ч) в относительно низких концентрациях без ущерба для жизнеспособности клеток [15].

Трифлуралин очень плохо растворяется в воде (0,22 мг/л при 20 °С) и обладает высокой летучестью (давление паров 6,7 мПа при 20 °С), но гербицид подвергается биологическому разложению [16]. Плохая растворимость в воде может вести к долгосрочному воздействию трифлуралина в водной среде.

## Заключение

Полученные результаты позволяют предположить, что механизм токсического воздействия трифлуралина на простейших может быть связан с нарушением функций клеточного деления, что согласуется с его известным механизмом действия — ингибирование деления клеток у растений.

На основании установленного порога статистической достоверности воздействия пороговой концентрацией для жизнедеятельности *Paramecium caudatum* в условиях данного эксперимента является концентрация гербицида Анонс к.э. – 2,5 мг/л. Недействующей концентрацией, то есть максимальной концентрацией, не оказывающей статистически значимого эффекта, признана концентрация 1,0 мг/л.

## Список литературы / References

- [1] Zhang Y, Hu M, Li A. Review of the occurrence of herbicides in environmental waters of Taihu Lake basin and its potential impact on submerged plants. *Water*. 2024;16(5):726. <https://doi.org/10.3390/w16050726> EDN: NIGFHG
- [2] Hu K, Wang Z, Coleman G, Bender A, Yao T, Zeng S, Song D, Schumann A, Walsh M. Deep learning techniques for in-crop weed recognition in large-scale grain production systems: a review. *Precision Agriculture*. 2023;25:1–29. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10073-1> EDN: VPGHZN
- [3] Böcker T, Möhring N, Finger R. Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production. *Agricultural Systems*. 2019;173:378–92. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.001>
- [4] Krimsky S. Can glyphosate-based herbicides contribute to sustainable agriculture? *Sustainability*. 2021;13(4):2337. <https://doi.org/10.3390/su13042337> EDN: FEBWFM
- [5] Zhou W, Li M, Achal VA. A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*. 2024;11(1):100410. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410> EDN: UJMANV
- [6] Shadskikh VA, Peshkova VO, Kizhaeva VE., Romanova L.G., Rasskazova O.L. The harmfulness of weeds and chemical methods of dealing with them on soybean crops under irrigation of Saratov Zavolzhye. *Melioration and Water Management*. 2016;(5):27–29. (In Russ.) EDN: WTHTKR  
*Шадских В.А., Пешкова В.О., Кизаева В.Е. Романова Л.Г., Рассказова О.Л.* Вредоносность сорняков и химические методы борьбы с ними на посевах сои в условиях орошения Саратовского Заволжья // Мелиорация и водное хозяйство. 2016. № 5. С. 27–29. EDN: WTHTKR
- [7] Zhang Q, He Z, Wang J. Acute toxicity, oxidative stress, toxicity mechanism, and degradation dynamics of trifluralin in *Eisenia foetide* (Annelida: Lumbricidae). *Journal of Entomological Science*. 2023;58(1):27–46. <https://doi.org/10.18474/JES22-06> EDN: OMFVPE
- [8] Chowdhury IF, Doran GS, Stodart BJ, Chen Ch, Wu H. Trifluralin and atrazine sensitivity to selected cereal and legume crops. *Agronomy*. 2020;10(4):587. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/4/587#>
- [9] Shadrin IA. Toxicological analysis of some feeds by the survival rate of the ciliate *Paramecium caudatum*. *Bulletin of KSAU*. 2008;(2):128–134. (In Russ.) EDN: ISDFHX  
*Шадрин И.А.* Токсикологический анализ некоторых кормов по реакции выживаемости инфузории *Paramecium caudatum* // Вестник КрасГАУ. 2008. № 2. С. 128–134. EDN: ISDFHX
- [10] Amanchi NR, Busa S, Bandaru V, Shetty PS. Acute toxicity effects of a herbicide, Glycel on freshwater ciliates *Paramecium caudatum*, *Oxytricha fallax* and *Blepharisma intermedium*. *Ecology, Environment and Conservation*. 2023;29(3):1425–1431. <http://doi.org/10.53550/EEC.2023.v29i03.064> EDN: VXHVOM
- [11] Mansano AS, Moreira RA, Dornfeld HC, Freitas EC, Vieira EM, Daam MA, et al. Individual and mixture toxicity of carbofuran and diuron to the protozoan *Paramecium caudatum* and the cladoceran *Ceriodaphnia silvestrii*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;201:110829. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110829> EDN: ZQADWL
- [12] Kawano T, Kosaka T, Hosoya H. Impact of a sulfonylureic herbicide on growth of photosynthetic and non-photosynthetic Protozoa. In: Lichtfouse E, Schwarzbauer J, Robert D, editors. *Environmental Chemistry: Green Chemistry and Pollutants in Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2005. p. 495–504. [https://doi.org/10.1007/3-540-26531-7\\_45](https://doi.org/10.1007/3-540-26531-7_45)

- [13] Miyoshi N, Kawano T, Tanaka M, Kadono T, Kosaka T, Kunimoto M, et al. Use of *Paramecium* species in bioassays for environmental risk management: Determination of IC50 values for water pollutants. *Journal of Health Science*. 2003;49(6):429–435. <https://doi.org/10.1248/jhs.49.429>
- [14] Badgar K, Prokisch J. Testing Toxicity and Antidote Effect of Selenium Nanoparticles with *Paramecium caudatum*. *Open Journal of Animal Sciences*. 2021;11(4):532–542. <https://doi.org/10.4236/ojas.2021.114036> EDN: JRPIFR
- [15] Pape R, Kissmehl R, Glas-Albrecht R, Plattner H. Effects of anti-microtubule agents on *Paramecium* cell culture growth. *European Journal of Protistology*. 1991;27(3):283–289. [https://doi.org/10.1016/S0932-4739\(11\)80066-0](https://doi.org/10.1016/S0932-4739(11)80066-0)
- [16] Coleman NV, Rich DJ, Tang FHM, Vervoort RW, Maggi F. Biodegradation and abiotic degradation of trifluralin: a commonly used herbicide with a poorly understood environmental fate. *Environmental Science & Technology*. 2020;54(17):10399–10410. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02070> EDN: WKZZZT

### Сведения об авторах:

*Калюжная Ольга Дмитриевна*, аспирант департамента рационального природопользования, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5. ORCID: 0009-0008-1615-3665; eLIBRARY SPIN-код: 8329-6999. E-mail: 1142240104@pfur.ru.

*Полынова Галина Вячеславовна*, кандидат биологических наук, доцент, департамент рационального природопользования, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5. ORCID: 0000-0003-0217-5771, eLIBRARY SPIN-код: 5257-1556, Scopus Author ID 55948416400. E-mail: polynova-gv@rudn.ru.

### Bio notes:

*Olga D. Kalyuzhnaya*, Postgraduate Student of the Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 8/5 Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-1615-3665; eLIBRARY SPIN-code: 8329-6999. E-mail: 1142240104@rudn.ru.

*Galina V. Polynova*, PhD of Biological Science, Associate Professor, Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 8/5 Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0217-5771, eLIBRARY SPIN-code: 5257-1556, Scopus Author ID 55948416400. E-mail: polynova-gv@rudn.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-245-256

EDN: PUXJSB

УДК 332.3:632.95:638.1

Научная статья / Research article

## Может ли использование пестицидов представлять угрозу для пчелиных колоний в аграрном секторе

А.Б. Третьякова<sup>1</sup>, М.Н. Мукминов<sup>1</sup>, Н.Д. Шамаев<sup>2,3</sup><sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация<sup>2</sup>МГАВМиБ — МВА имени К.И. Скрябина, Москва, Российская Федерация<sup>3</sup>ФНЦ — Всероссийский НИИ экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко РАН, Москва, Российская Федерация [annatretyackowa@yandex.ru](mailto:annatretyackowa@yandex.ru)

**Аннотация.** Интенсификация аграрного производства ведет к росту пестицидной нагрузки и трансформации землепользования. Актуальность работы обусловлена необходимостью интегрированных мер по снижению рисков для насекомых-опылителей, таких как медоносные пчелы. Исследование направлено на комплексную оценку взаимосвязи структуры землепользования, динамики пестицидной нагрузки и пространственного распределения пчеловодства на примере Республики Татарстан за 2020–2024 гг. Используются официальные статистические данные и результаты пространственного геоинформационного анализа с оценкой удельного расхода средств защиты растений и распределения пчелосемей по муниципальным районам. Выявлена территориальная неоднородность пчеловодства и сдвиги в применении пестицидов с ростом гербицидной нагрузки и колебаниями применения инсектицидов. В муниципальных районах выявлены зоны совпадения высокой плотности пчелосемей и интенсивной пестицидной обработки (30–54 % от общей площади сельхозугодий), что создает угрозу пестицидной нагрузки.

**Ключевые слова:** пестицидная нагрузка, пчеловодство, агроландшафты, средства защиты растений, QGIS, Республика Татарстан

**Вклад авторов.** Третьякова А.Б. — проведение исследования, концептуализация, визуализация, создание и редактирование рукописи. Мукминов М.Н. — научное руководство исследованием, верификация данных, критический анализ текста. Шамаев Н.Д. — проведение исследования, визуализация, создание и редактирование рукописи, критический анализ текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

© Третьякова А.Б., Мукминов М.Н., Шамаев Н.Д., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**История статьи:** поступила в редакцию 03.11.2025; доработана после рецензирования 21.12.2025; принята к публикации 24.02.2026.

**Для цитирования:** Третьякова А.Б., Мукминов М.Н., Шамаев Н.Д. Может ли использование пестицидов представлять угрозу для пчелиных колоний в аграрном секторе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 245–256. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-245-256> EDN: PUXJSB

## May the use of pesticides pose a threat to bee colonies in the agricultural sector

Anna B. Tretiakova<sup>1</sup>, Malik N. Mukminov<sup>1</sup>, Nikolai D. Shamaev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K.I. Skryabin, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>FSC — All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Medicine named after K.I. Skryabin and Ya.R. Kovalenko of the RAS, Moscow, Russian Federation

✉ [annatretyackowa@yandex.ru](mailto:annatretyackowa@yandex.ru)

**Abstract.** The intensification of agricultural production is leading to an increase in pesticide loads and land-use transformation. The relevance of this work is due to the need for integrated risk-reduction measures for insect pollinators such as honeybees. The study is aimed at a comprehensive assessment of the relationship between land use structure, pesticide load dynamics, and the spatial distribution of beekeeping on the case study of the Republic of Tatarstan from 2020 to 2024. To achieve this, official statistical data and spatial geoinformation analysis were used to evaluate the specific consumption of plant protection products and the distribution of bee colonies across municipal districts. Territorial heterogeneity of beekeeping and shifts in the use of pesticides with increasing herbicidal load and fluctuations in the use of insecticides were identified. Areas of high bee density and intensive pesticide use (30–54% of total farmland area) are identified in municipal areas, posing a risk of pesticide loading.

**Keywords:** agricultural landscapes, pesticide load, beekeeping, plant protection products, QGIS, Republic of Tatarstan

**Authors' contribution.** *A.B. Tretiakova* — research, conceptualization, visualization, manuscript creation and editing. *M.N. Mukminov* — scientific supervision of the study, data verification, critical analysis of the text. *N.D. Shamaev* — research, visualization, manuscript creation and editing, critical analysis of the text. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Data availability statement.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history:** received 03.11.2025; revised 21.12.2025; accepted 24.02.2026.

**For citation:** Tretiakova AB, Mukminov MN, Shamaev ND. May the use of pesticides pose a threat to bee colonies in the agricultural sector. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):245–256. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-245-256>  
EDN: PUXJSB

## Введение

Интенсификация аграрного производства существенно увеличивает риски для насекомых-опылителей, в том числе для пчел. Главным образом это происходит за счет изменения структур землепользования и увеличения пестицидной нагрузки [1]. Интенсивные сельскохозяйственные практики могут быть причиной загрязнения техногенного характера [2]. Но, что важнее, они предусматривают широкое и зачастую бесконтрольное применение пестицидов, что может приводить к сокращению численности пчелиных колоний, влиять на биоразнообразие и превалентность их эндо- и эктопаразитов [3–8]. Это, в свою очередь, угрожает продуктивности и качеству сельскохозяйственных культур, а также устойчивости экосистем.

В условиях глобального стремления к обеспечению продовольственной безопасности и повышению аграрной продуктивности Республика Татарстан, как один из ведущих агропромышленных регионов Российской Федерации, демонстрирует устойчивую тенденцию к технологической интенсификации сельского хозяйства<sup>1</sup>. Однако рост объемов применения средств защиты растений, трансформация структуры севооборотов и доминирование крупных агроформирований создают новые экологические вызовы [9], особенно в части сохранения биоразнообразия и функциональной целостности агроэкосистем. Особую уязвимость в этом контексте представляют популяции медоносных пчел — ключевых агентов экосистемной услуги опыления, обеспечивающей урожайность до 75 % сельскохозяйственных культур [10]. Несмотря на соблюдение санитарно-гигиенических норм, в регионе сохраняется критическая проблема отсутствия санитарно-защитных зон между обрабатываемыми полями и населенными пунктами, где традиционно размещаются пасеки.

**Цель исследования** — комплексная оценка взаимосвязи между структурой землепользования, динамикой пестицидной нагрузки и пространственным распределением пчеловодства в Республике Татарстан за 2020–2024 гг. на основе официальной статистики и геоинформационного анализа. Особое внимание уделено выявлению зон экологического конфликта, где высокая плотность пчелосемей совпадает с максимальной интенсивностью применения химических средств защиты растений.

<sup>1</sup> Государственная программа Республики Татарстан «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Республике Татарстан». URL: <https://agro.tatarstan.ru/> (дата обращения: 31.10.2025).

## Материалы и методы

В исследовании использованы официальные статистические данные Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Татарстан и Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан. Материалы включают сведения о площадях сельскохозяйственных угодий, структуре землепользования, объемах и видах применяемых средств защиты растений, а также статистические данные отрасли пчеловодства.

Количественная оценка интенсивности химической нагрузки на агросистемы рассчитывалась с использованием показателя удельного расхода применения средств защиты растений для сравнительного анализа фитосанитарной нагрузки по годам и классам препаратов. Данный показатель рассчитан как отношение массы действующих веществ к площади обработки и выражен в т/тыс. га [11].

Для пространственного анализа и визуализации региональных различий в развитии пчеловодства была построена тематическая карта с использованием программного обеспечения QGIS 3.44.3. Основой служили административно-территориальные границы муниципальных районов Республики Татарстан. На карте отображено распределение количества пчелосемей по районам, что позволило выявить зоны концентрации пчеловодческой деятельности, а также территории с низким уровнем развития отрасли. Методологически исследование базируется на принципах системного анализа, сравнительной статистики и оценки экологических рисков. Данные интерпретированы в контексте концепции устойчивого землепользования и принципов интегрированной защиты растений.

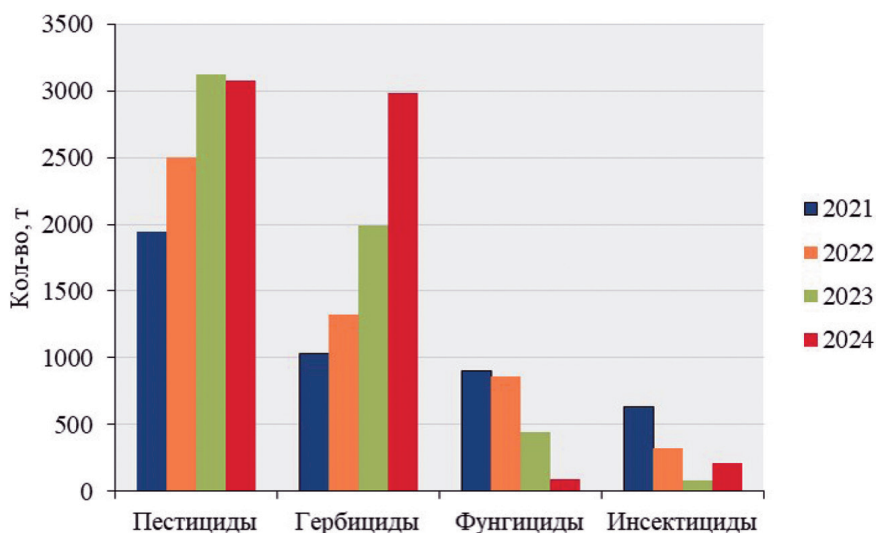
## Результаты

Численность пчелосемей в Республике Татарстан имеет выраженную территориальную неравномерность размещения, что отражает как природно-климатические особенности региона, так и уровень развития пчеловодства как отрасли сельского хозяйства (рис. 1).

Наибольшее количество пчелосемей сосредоточено в Мамадышском, Азнакаевском и Арском районах<sup>2</sup>. Эти территории характеризуются наличием обширных луговых угодий, лесных массивов и разнообразной медоносной базы, что создает благоприятные условия для интенсивного пчеловодства. Значительные объемы пчелосемей также отмечены в Лаишевском, Муслюмовском, Нижнекамском, Альметьевском и Лениногорском районах — зонах с развитой аграрной инфраструктурой и активной поддержкой отрасли на муниципальном уровне. Средние значения характерны для большинства центральных и северных районов республики, что указывает на умеренный, но стабильный уровень развития пчеловодства.

<sup>2</sup> Реестр пчеловодства Республики Татарстан. URL: <https://agro.tatarstan.ru/reestr-pchelovodstvu-4701889.htm> (дата обращения: 31.10.2025).





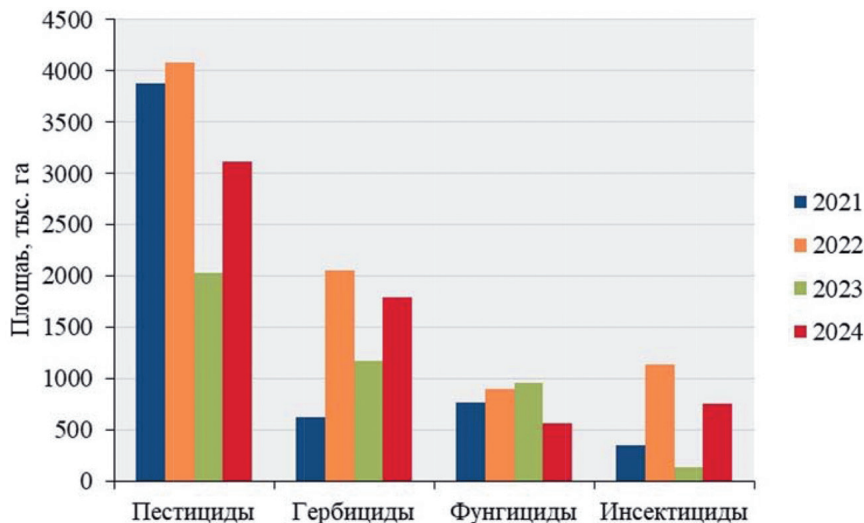
**Рис. 2.** Динамика объемов применения химических средств защиты растений в сельскохозяйственном производстве Республики Татарстан

*Источник:* составлено А.Б. Третьяковой на основе анализа данных, представленных в Государственных докладах о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан 2021–2024 гг.

Ключевым трендом является увеличение применения гербицидов, их объем увеличился с 1034,23 т в 2021 г. до 2984,31 т в 2024 г., что свидетельствует о стратегическом смещении фитосанитарных практик в сторону интенсивного химического подавления сорной растительности. Этот рост коррелирует с расширением посевов пропашных культур и изменением структуры севооборотов, требующих более жесткого контроля над сорняками. Также наблюдается резкое сокращение применения фунгицидов — с 903,4 т в 2021 г. до 93,29 т в 2024 г., что указывает на снижение фитопатогенной нагрузки, вероятно, обусловленное внедрением устойчивых сортов, эффективных семенных протравителей и улучшением метеорологических условий вегетационного периода. Схожая тенденция прослеживается и в применении инсектицидов. После снижения с 633,2 т в 2021 г. до 75,52 т в 2023 г. отмечено частичное восстановление до 211,34 т в 2024 г., что может быть связано с локальными вспышками вредителей или переходом на профилактические режимы применения системных препаратов. Структурная перестройка применения средств защиты растений отражает эволюцию агротехнологий в направлении повышения эффективности химической защиты, однако требует дополнительной оценки экологических последствий, особенно в условиях сохраняющегося отсутствия санитарно-защитных зон и высокой антропогенной нагрузки на агроэкосистемы региона<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2024 году. Казань, 2025. 386 с.

Общая площадь обработки пестицидами достигла пика в 2022 г. — 4085,75 тыс. га, после чего резко сократилась в 2023 г. до 2034,05 тыс. га, что свидетельствует о концентрации обработок на меньших территориях, вероятно, с использованием повторных или повышенных дозировок препаратов (рис. 3).



**Рис. 3.** Динамика площадей обработки химическими средствами защиты растений в сельскохозяйственном производстве Республики Татарстан

*Источник:* составлено А.Б. Третьяковой на основе анализа данных, представленных в Государственных докладах о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан 2021–2024 гг.

Площадь обработки гербицидами выросла с 626,09 тыс. га в 2021 г. до 2053,95 тыс. га в 2022 г.<sup>5</sup> В 2023 г. произошло существенное снижение, но к 2024 г. площадь вновь увеличилась до 1794 тыс. га. Фунгицидная нагрузка характеризуется устойчивым снижением. Площадь обработки сократилась с 762,5 тыс. га в 2021 г. до 564,14 тыс. га в 2024 г., что, возможно, свидетельствует о снижении эпифитотической активности. Отсутствие роста площади, несмотря на сохраняющийся объем применяемых препаратов, указывает на повышение точности и целенаправленности обработок [12; 13]. В случае инсектицидов наблюдается высокая волатильность. После роста с 352,2 тыс. га в 2021 г. до 1139,3 тыс. га в 2022 г. произошло резкое падение в 2023 г. до 130,3 тыс. га, с последующим частичным восстановлением до 751,94 тыс. га

<sup>5</sup> См.: Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году. Казань, 2021. 400 с.; Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2021 году. Казань, 2022. 412 с.; Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2022 году. Казань, 2023. 396 с.; Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2023 году. Казань, 2024. 400 с.; Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2024 году. Казань, 2025. 386 с.

в 2024 г. Это может свидетельствовать о локализации энтомологических угроз, применении целевых биологических методов контроля или переходе на системные препараты с длительным действием, позволяющие ограничивать площади обработки [14; 15]. Показатель удельного расхода пестицидов в целом демонстрирует нелинейную динамику (табл.).

**Удельный расход применения средств защиты растений в Республике Татарстан за 2021–2024 год, т/тыс. га**

Химическое средство защиты	2021	2022	2023	2024
Пестициды	0,50	0,61	1,54	0,99
Гербициды	1,65	0,65	1,70	1,66
Фунгициды	1,18	0,96	0,46	0,17
Инсектициды	1,80	0,28	0,58	0,28

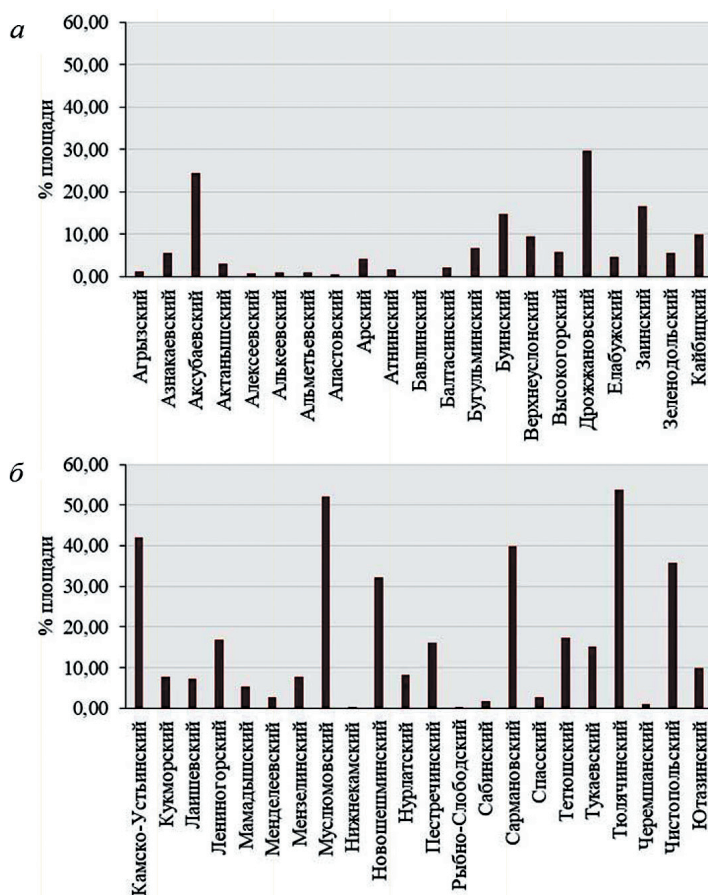
Источник: составлено А.Б. Третьяковой.

После умеренного роста пестицидов в 2022 г. наблюдается резкий скачок в 2023 г. до 1,54 т/тыс. га, что связано с концентрацией обработок на значительно сократившейся площади, и последующее снижение до 0,99 т/тыс. га в 2024 г. Удельный расход гербицидов оставался стабильно высоким — от 1,65 до 1,70 т/тыс. га, достигнув максимума в 2023 г. и сохранив высокий уровень в 2024 г. В то же время зафиксировано резкое и устойчивое снижение удельного применения фунгицидов — с 1,18 т/тыс. га в 2021 г. до лишь 0,17 т/тыс. га в 2024 г., что указывает на снижение фитопатогенной нагрузки или эффективность профилактических мер. Аналогичная тенденция наблюдается по инсектицидам, их удельный расход сократился с 1,80 т/тыс. га в 2021 г. до 0,28 т/тыс. га в 2022 и 2024 гг., несмотря на кратковременный рост в 2023 г. Пространственное распределение инсектицидной нагрузки в Республике Татарстан неоднородно. Доля площади, обработанной инсектицидами относительно общей площади сельскохозяйственных угодий района, варьирует от 0 до 53,82 % (рис. 4).

Такая широкая амплитуда свидетельствует о высокой локализации энтомологических рисков и существенных различиях в фитосанитарных стратегиях между муниципальными образованиями<sup>6</sup>. Наиболее интенсивная инсектицидная обработка характерна для отдельных юго-восточных и центральных районов республики, где доля обработанных площадей превышает 30–50 %. Эти территории, как правило, специализируются на возделывании пропашных и масличных культур, чувствительных к насекомым-вредителям, и отличаются высоким уровнем агротехнологической интенсификации. В то же время в ряде районов — преимущественно в северных и северо-западных

<sup>6</sup> Система земледелия Республики Татарстан. URL: <https://agro.tatarstan.ru/sistema-zemledeliya-rt.htm> (дата обращения: 31.10.2025).

зонах — применение инсектицидов либо полностью отсутствует, либо ограничено менее чем 1 % обрабатываемой площади. Подобная практика может быть обусловлена как низкой фитосанитарной нагрузкой, так и переходом к профилактическим или биологическим методам защиты, включая использование системных протравителей и выпуск энтомофагов [16–17]. Средние значения от 5 до 15 % наблюдаются в большинстве районов и отражают умеренный уровень энтомологического давления при сбалансированном применении химических и нехимических мер защиты. При этом пространственный анализ выявляет тревожную тенденцию. Зоны с максимальной инсектицидной нагрузкой пространственно совпадают с районами, где сосредоточено наибольшее количество пчелосемей. Это создает условия для прямого воздействия токсичных препаратов на медоносных пчел и других опылителей, особенно в условиях отсутствия санитарно-защитных зон между сельскохозяйственными угодьями и населенными пунктами.



**Рис. 4.** Пространственное распределение доли площади, обработанной инсектицидами, в структуре сельскохозяйственных угодий муниципальных районов Республики Татарстан, %: а — от Агрызского до Кайбицкого района; б — от Камско-Устьинского до Ютазинского района

Источник: составлено А.Б. Третьяковой на основе анализа данных, представленных в Государственных докладах о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан 2021–2024 гг.

## Заключение

Анализ состояния земельных ресурсов и агротехнических практик в Республике Татарстан за 2020–2024 гг. выявил устойчивую тенденцию к интенсификации сельскохозяйственного производства, сопровождающуюся глубокой перестройкой структуры применения средств защиты растений. Особую научную и практическую значимость представляет пространственный анализ, демонстрирующий критическое совпадение зон высокой плотности пчеловодства и интенсивного применения инсектицидов. Наибольшее количество пчелосемей сосредоточено в районах, характеризующихся не только развитой аграрной инфраструктурой, но и максимальными показателями инсектицидной нагрузки — таких как Мамадышский, Азнакаевский, Арский, Сармановский и Тюлячинский районы. В этих территориях доля площадей, обработанных инсектицидами, достигает 30–54 % от общей площади сельхозугодий, что создает потенциально опасные условия для медоносных пчел и других опылителей. Учитывая, что в большинстве районов отсутствуют санитарно-защитные зоны между сельскохозяйственными полями и населенными пунктами, где часто располагаются пасеки, риск токсического воздействия агрохимикатов на нецелевые организмы остается высоким. Несмотря на сокращение объемов инсектицидов в последние годы, их удельная нагрузка в ряде периодов остается значительной.

## Список литературы

- [1] *Macri I.N., Moja P.J., Latorre Estivalis J.M., Cristos D.S., Zavala J.A., Farina W.M.* Agricultural intensification impairs behavioral abilities and the expression of genes associated with social responsiveness in honeybees // *One Earth*. 2024. Vol. 7. No. 9. P. 1569–1586. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.012> EDN: WXBVAV
- [2] *Шамаев Н.Д., Дубина Д.Р., Шуралев Э.А.* Оценка токсичности кадмия и свинца в отношении *Galleria mellonella* с выявлением потенциальных белковых маркеров насекомого // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. Серия: Естественные науки. 2025. № 3. С. 140–146. <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2025-3-10> EDN: SAEYYD
- [3] *Шамаев Н.Д.* Методы биотехнологии в изучении экологии и биогеографии медоносной пчелы и решении проблем интенсификации пчеловодства // *Пчеловодство и апитерапия: актуальные вопросы, достижения и инновации : материалы Международной научно-практической конференции, Рыбное, 15–16 декабря 2023 года*. Рыбное : Федеральный научный центр пчеловодства, 2024. С. 194–198. EDN: ISBLYO
- [4] *Киркина Е.Г., Богомолов А.И., Воронежская Е.Е., Макавеева К.А., Мизгурев И.В., Калугев А.В., Плотникова В.Д., Шамаев Н.Д.* Использование альтернативных тест-систем в доклинической практике // *Консультант GLP-Planet 2024*. Мнение фармацевтической отрасли. Санкт-Петербург : Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Дом Фармации», 2024. С. 299–319. <https://doi.org/10.57034/978-5-6048955-9-7-s8> EDN: ZBNVUS
- [5] *Шамаев Н.Д., Сальников В.В., Кошпаева Е.С., Сычев К.В.* Увеличение заболеваемости нозематозом вблизи экологического стрессора // *XI Международная конференция*

- молодых ученых: биоинформатиков, биотехнологов, биофизиков, вирусологов, молекулярных биологов и специалистов фундаментальной медицины : сборник тезисов, Научград Кольцово, 24–27 сентября 2024 года. Новосибирск : Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2024. С. 569–570.
- [6] Шамаев Н.Д. Предпосылки существования вариаций врожденного иммунного ответа *Galleria mellonella* // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24. № 11. С. 1492–1501. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1492-1501> EDN: WBXUNI
- [7] Shamaev N.D., Salnikov V.V., Yuzmanova L.A., Shuralev E.A., Mukminov M.N. Regular occurrence of atypically small spores in *Apis mellifera carnica* (Hymenoptera: Apidae), naturally infected with *Nosema* spp. (Microsporidia) // *Invertebrate Zoology*. 2024. 21(4): 478–486. <https://doi.org/10.15298/invertzool.21.4.03> EDN: CYMNHU
- [8] Газетдинов Ф.И., Шуралев Э.А., Шамаев Н.Д. Подбор моделей для агентного моделирования рисков изменения экологии инфекционных заболеваний у медоносной пчелы // Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической : материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ростов-на-Дону, 13–14 ноября 2024 года. Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2025. С. 328–331. EDN: WJOLZB
- [9] Салихов Д.Г., Петров С.В., Шамаев Н.Д., Казарян Г.Г., Гайфутдинова Н.Р., Выборнова И.Б., Мукминов М.Н., Шуралев Э.А. Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами в биогеохимических провинциях Республики Татарстан // *Journal of Agriculture and Environment*. 2023. № 8 (36). <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.36.8> EDN: LNCFBW
- [10] Третьякова А.Б., Шамаев Н.Д. Системы мониторинга технологий и оптимизация ухода в современном пчеловодстве // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии : сборник научных трудов. 2025. № 123. С. 92–97. <https://doi.org/10.31016/vet.san.2025-123-17> EDN: RVRCAZ
- [11] Тойгильдина И.А., Тойгильдин А.Л., Еремина С.А. Экотоксикологическая оценка применения пестицидов на территории Ульяновской области // Вестник Ульяновской ГСХА. 2014. № 2 (26). С. 37–44. EDN: SJCFPP
- [12] Хамитова Р.Я., Мирсаитова Г.Т. Современные тенденции в области применения пестицидов // Гигиена и санитария. 2014. № 4. С. 23–26. EDN: TALSHJ
- [13] Хамитова Р.Я., Сабирзянов А.Р., Зиятдинов В.Б. Гигиеническая оценка применения пестицидов и минеральных удобрений в земледелии Республики Татарстан // Казанский медицинский журнал. 2017. Т. 98. № 1. С. 116–121. <https://doi.org/10.17750/KMJ2017-116> EDN: XQTYAH
- [14] Chidawanyika F., Mudavanhu P., Nyamukondiwa C. Biologically based methods for pest management in agriculture under changing climates: challenges and future directions // *Insects*. 2012. Vol. 3. No. 4. P. 1171–1189. <https://doi.org/10.3390/insects3041171> EDN: RLDXUF
- [15] Stalder S., Fracheboud M., Stalder A.-K., Droz B., Chiaia-Hernández A.C., Kast C. Bee bread collected by honey bees (*Apis mellifera*) as a terrestrial pesticide biomarker to complement water studies // *Pest Management Science*. 2025. Vol. 81. No. 3. P. 1400–1411. <https://doi.org/10.1002/ps.8541> EDN: XMFKLT
- [16] Bale J.S., van Lenteren J.C., Bigler F. Biological control and sustainable food production // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2008. Vol. 363. No. 1492. P. 761–776. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2182>
- [17] Duso C., Van Leeuwen T., Pozzebon A. Improving the compatibility of pesticides and predatory mites: recent findings on physiological and ecological selectivity // *Current Opinion in Insect Science*. 2020. Vol. 39. P. 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.03.005> EDN: ZOCWYP

### **Сведения об авторах:**

*Третьякова Анна Борисовна*, аспирант, Институт экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлевская, д. 18. ORCID: 0000-0002-0359-4049; eLIBRARY SPIN-код: 3454-1042. E-mail: annatretuyackowa@yandex.ru.

*Мукминов Малик Нилович*, доктор биологических наук, профессор кафедры прикладной экологии, Институт экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Российская Федерация, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18. ORCID: 0000-0002-5996-0271; eLIBRARY SPIN-код: 9384-9684. E-mail: malik-bee@mail.ru.

*Шамаев Николай Дмитриевич*, кандидат биологических наук, доцент кафедры паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, МГАВМиБ — МВА имени К.И. Скрябина, Российская Федерация, 109372, Москва, ул. Академика Скрябина, д. 23; младший научный сотрудник рабочей группы по выполнению государственного задания в области биотехнологии и вирусологии, ФНЦ — Всероссийский НИИ экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко РАН, Российская Федерация, 109428, Москва, ул. Рязанский проспект, д. 24, к. 1. ORCID: 0000-0002-0575-3760; eLIBRARY SPIN-код: 2602-2764. E-mail: nikolai.shamaev94@mail.ru.

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-257-274

EDN: OYGYFX

UDC 338.48

Research article / Научная статья

## Birdwatching as a regenerative tourism practice: evidence from Brazilian public policy

Marcos R. Pisarski Jr. 

*Itaipu Parquetec (Itaipu Technology Park), Sustainable Tourism Laboratory, Foz do Iguaçu,  
Brazil*

✉ [marcos.pisarski@gmail.com](mailto:marcos.pisarski@gmail.com)

**Abstract.** The development of regenerative tourism has been proposed as a response to the limitations of conventional sustainable tourism, particularly its restricted capacity to address long-term socioecological challenges. However, empirical evidence supporting regenerative tourism remains limited, especially at territorial and public policy scales in biodiverse countries. This study aims to analyze birdwatching tourism as a regenerative-oriented tourism practice in Brazil, based on national public policy evidence. The research adopts analytical and conceptual design grounded in secondary data analysis. The primary source is the National Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil published by the Ministry of Tourism in 2025, complemented by institutional reports and peer-reviewed scientific literature on bird conservation, citizen science, and regenerative tourism. The data were reinterpreted using an analytical framework focused on key regenerative dimensions, including conservation financing, biodiversity monitoring, participatory governance, and territorial planning. The results indicate that birdwatching tourism in Brazil operates predominantly within areas of high conservation priority and is supported by measurable mechanisms relevant to regeneration. These mechanisms include the generation of economic resources associated with conservation activities, large-scale biodiversity monitoring through citizen science platforms, and institutionalized governance arrangements aligned with biodiversity conservation policies. Although the concept of regenerative tourism is not explicitly employed in Brazilian tourism policy, birdwatching tourism demonstrates functional characteristics consistent with regenerative principles. The study concludes that birdwatching tourism in Brazil can be understood as a regenerative-oriented practice when regeneration is interpreted as a long-term, systemic, and policy-mediated process. The findings contribute to strengthening the empirical basis of regenerative tourism research and highlight the relevance of public policy analysis for assessing regenerative dynamics in megadiverse contexts.

**Keywords:** avitourism, biodiversity conservation, citizen science, tourism governance, Brazil

**Conflicts of interest.** The author declares no conflicts of interest.

© Pisarski Jr. M.R., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** Artificial intelligence (AI) tools were used solely for language editing, including orthographic revision and assistance with the formatting and standardization of citations and references. No AI technologies were used in the generation, analysis, or interpretation of the research content. The authors declare that they fully understand and accept full responsibility for the content of this manuscript. The use of artificial intelligence tools was of a supporting nature and did not replace the authors' expert judgment, critical thinking, or scientific integrity.

**Data availability statement.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history.** received 17.01.2026; revised 17.02.2026; accepted 26.02.2026.

**For citation:** Pisarski Jr. MR. Birdwatching as a regenerative tourism practice: evidence from Brazilian public policy. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):257–274. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-257-274> EDN: OYGYFX

## Наблюдение за птицами как практика регенеративного туризма: свидетельства из государственной туристской политики Бразилии

Маркус Р. Писарски мл. 

*Itaipu Parquetec (Технологический парк Итайпу), Лаборатория устойчивого туризма,  
Фос-ду-Игуасу, Бразилия  
✉ marcos.pisarski@gmail.com*

**Аннотация.** Регенеративный туризм рассматривается как ответ на ограничения традиционного устойчивого туризма, особенно в части решения долгосрочных социоэкологических проблем. При этом эмпирические исследования регенеративного туризма остаются ограниченными, в частности на уровне территориальной политики в биологически богатых странах. Цель исследования — проанализировать орнитологический туризм как регенеративно-ориентированную туристскую практику в Бразилии на основе данных государственной политики. Исследование основано на аналитико-концептуальном подходе и анализе вторичных данных. Основным источником является Национальный диагностический отчет по государственной политике в сфере туризма наблюдения за птицами в Бразилии (Министерство туризма, 2025), дополненный институциональными материалами и рецензируемыми научными публикациями. Анализ проведен с использованием рамки регенеративного туризма, включающей финансирование охраны природы, мониторинг биоразнообразия, партисипативное управление и территориальное планирование. Результаты показывают, что орнитологический туризм в Бразилии реализуется преимущественно на территориях с высокой природоохранной значимостью и опирается на измеримые регенеративные механизмы, такие как формирование экономических ресурсов для охраны природы, масштабный мониторинг биоразнообразия на основе гражданской науки и институционализованные управленческие структуры, согласованные с политикой сохранения биоразнообразия. Несмотря на отсутствие термина «регенеративный туризм» в туристской политике страны, орнитологический туризм демонстрирует функциональные признаки регенеративного подхода. Сделан вывод о том, что орнитоло-

гический туризм в Бразилии может рассматриваться как регенеративно-ориентированная практика при интерпретации регенерации как долгосрочного и системного процесса, опосредованного государственной политикой.

**Ключевые слова:** авитуризм, сохранение биоразнообразия, гражданская наука, управление туризмом, Бразилия

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** Инструменты искусственного интеллекта (ИИ) использовались исключительно для языкового редактирования, включая орфографическую проверку, а также для помощи в форматировании и стандартизации цитат и библиографических ссылок. Технологии ИИ не использовались при создании, анализе или интерпретации научного содержания исследования. Авторы заявляют, что полностью осознают и принимают на себя всю полноту ответственности за содержание данной рукописи. Использование инструментов искусственного интеллекта носило вспомогательный характер и не заменяло экспертного суждения, критического мышления и научной добросовестности авторов.

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**История статьи:** поступила в редакцию 17.01.2026; доработана после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 26.02.2026.

**Для цитирования:** *Pisarski Jr. M.R.* Birdwatching as a regenerative tourism practice: evidence from Brazilian public policy // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 257–274. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-257-274> EDN: OYGYFX

## Introduction

Over the last two decades, tourism research and practice have increasingly recognized the structural limitations of conventional sustainable tourism frameworks. While sustainability-oriented approaches have contributed to mitigating negative environmental and social impacts, they have often remained restricted to damage reduction and efficiency gains, without directly addressing the regeneration of degraded socioecological systems. In response to these limitations, regenerative tourism has emerged as an alternative paradigm that emphasizes active restoration, system renewal, and the long-term vitality of ecosystems and host communities, grounded in systems thinking, regenerative design, and adaptive governance [1–5].

Recent academic literature indicates a growing consolidation of regenerative tourism as a field of inquiry, particularly in relation to development challenges faced by regions in the Global South. Empirical and policy-oriented studies demonstrate that regenerative tourism seeks not only to reduce negative impacts but to generate net positive ecological, social, and economic outcomes through place-based strategies, community engagement, and alignment with territorial development processes. Applied cases documented in Brazil, such as reef restoration initiatives integrated with tourism activities, illustrate how regenerative principles can be

operationalized through concrete actions involving conservation, local actors, and public policies [1–3; 5; 6]. Nevertheless, despite this conceptual and empirical advancement, several authors highlight the persistent scarcity of systematically documented cases demonstrating how regenerative principles are translated into consistent tourism practices and governance arrangements, particularly at national and territorial scales [1; 5; 7].

From a broader environmental science perspective, regeneration is increasingly understood as a measurable process involving ecosystem recovery, ecological connectivity, and long-term resilience. Large-scale empirical evidence demonstrates that conservation strategies prioritizing connectivity can significantly enhance biodiversity protection and fisheries conservation outcomes, producing measurable ecological benefits when supported by coherent territorial planning and governance frameworks [8]. At the same time, research on natural forest regeneration in the Brazilian Amazon reveals that regenerative outcomes are strongly conditioned by institutional coordination, policy design, and governance capacity, highlighting that regeneration is not solely an ecological process but also a political and institutional one [9]. These findings provide a robust scientific basis for examining tourism practices that operate in close alignment with conservation policies and landscape-scale planning instruments.

Within this context, nature-based tourism has been identified as a particularly favorable field for regenerative experimentation. Activities characterized by low material intensity, strong educational components, and close interaction with natural systems offer opportunities to align tourism demand with conservation incentives, learning processes, and territorial development goals. Among these activities, birdwatching — also referred to as avitourism or birding — stands out due to its documented links to biodiversity conservation, environmental education, citizen science, and local economic development [10–14].

Birdwatching tourism has been shown to generate high-value, low-volume tourism flows, contribute to conservation financing, and support biodiversity monitoring through the active participation of visitors in citizen-science platforms. Empirical evidence from different geographical contexts indicates that birdwatching can reinforce pro-conservation attitudes, support protected areas, and strengthen local economies without the pressures commonly associated with mass tourism [10; 13–15]. These characteristics position birdwatching as a tourism practice that potentially transcends conventional sustainability paradigms and aligns with core regenerative tourism principles.

In Brazil, a megadiverse country hosting nearly two thousand bird species and high levels of endemism, birdwatching tourism has expanded significantly over recent decades and has gained increasing institutional recognition. This process culminated in 2025 with the publication of the *Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil* by the Brazilian Ministry of Tourism (Figure 1).

The document provides comprehensive empirical evidence on demand profiles, territorial distribution, governance arrangements, sectoral organization, and the policy instruments shaping birdwatching tourism in the country.<sup>1</sup>

In parallel with national policy instruments, Brazil's international tourism promotion agency, Embratur, has incorporated birdwatching into its strategic positioning as a nature-based tourism segment in international markets. In 2024, Embratur published the institutional report *Everything about Birdwatching* (Figure 2), which systematizes key empirical information relevant to birdwatching tourism, the distribution of birdwatching destinations across all major biomes, the strong overlap between birdwatching areas and protected territories, and the country's international air connectivity with strategic source markets for nature-based tourism.<sup>2</sup> By framing birdwatching as a high-value, low-volume activity aligned with biodiversity conservation and specialized tourism demand, the document reinforces the articulation between conservation agendas, territorial planning, and international tourism policy.

Although neither the national diagnosis nor the international promotion documents explicitly adopt the terminology of regenerative tourism, their empirical findings reveal a tourism practice that operationalizes several core regenerative

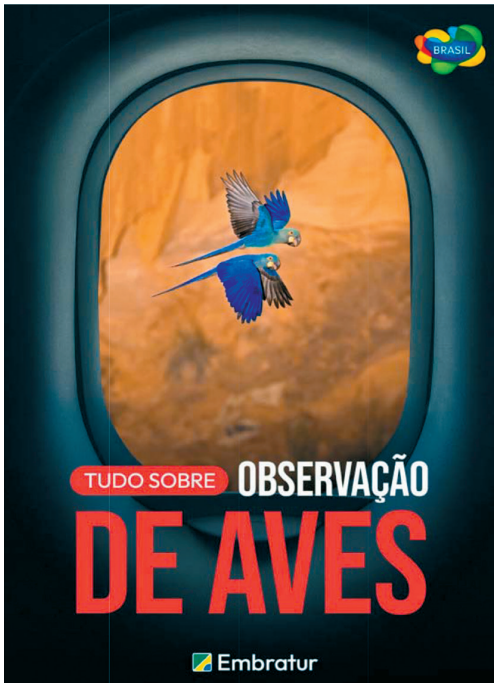


**Figure 1.** Cover of National Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil

Source: *Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil*. Brazil. Ministry of Tourism. Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

<sup>1</sup> Brazil. Ministério do Turismo. *Diagnóstico de Políticas Públicas do Turismo de Observação de Aves no Brasil*. Brasília: Ministério do Turismo; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

<sup>2</sup> Tudo sobre. *Observação de aves*. Brasília. Embratur. Brasília: Brazilian Agency for International Tourism Promotion; 2024. Available from: [https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil\\_Embratur\\_E-book\\_Observacao\\_de\\_Aves\\_Maio\\_2024.pdf](https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil_Embratur_E-book_Observacao_de_Aves_Maio_2024.pdf) (accessed: 12.12.2025).



**Figure 2.** Cover of Everything about Birdwatching Report in Brazil

Source: Everything about Birdwatching — Brazil. Brazil, 2024: Brazil. Embratur. Brasília: Brazilian Agency for International Tourism Promotion; 2024. Available from: [https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil\\_Embratur\\_E-book\\_Observacao\\_de\\_Aves\\_Maio\\_2024.pdf](https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil_Embratur_E-book_Observacao_de_Aves_Maio_2024.pdf) (accessed: 12.12.2025).

dimensions in practice. These include ecological regeneration linked to conservation and biodiversity monitoring, social participation through community-based guiding and environmental education, economic value creation associated with high-value and low-volume tourism flows, and participatory governance supported by citizen-science infrastructures<sup>3</sup> [1; 3; 5; 14].

Against this backdrop, this article examines birdwatching tourism as an empirically grounded regenerative tourism practice, using Brazilian public policy evidence as its primary analytical foundation. By reinterpreting official policy data through a regenerative tourism framework, the study seeks to contribute to the consolidation of regenerative tourism research while strengthening the dialogue between theory, empirical evidence, and tourism policy in biodiverse contexts of the Global South.

## Research Aim and Analytical Framework

The aim of this study is to analyze birdwatching tourism in Brazil as an empirically grounded regenerative tourism practice, based on official public policy evidence. Rather than approaching birdwatching as an isolated tourism niche, the research focuses on its institutionalization within national and international policy instruments, seeking to reinterpret existing policy data through a regenerative tourism perspective. In doing so, the study contributes to the consolidation of regenerative tourism research by providing an empirically supported analysis

<sup>3</sup> Brazil. Ministry of Tourism. *Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025); Everything about Birdwatching — Brazil. Brazil. Embratur. Brasília: Brazilian Agency for International Tourism Promotion; 2024. Available from: [https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil\\_Embratur\\_E-book\\_Observacao\\_de\\_Aves\\_Maio\\_2024.pdf](https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil_Embratur_E-book_Observacao_de_Aves_Maio_2024.pdf) (accessed: 12.12.2025).

of how regenerative principles are operationalized in practice within a nature-based tourism context in the Global South.

Specifically, the analysis examines the extent to which birdwatching tourism policies and institutional arrangements in Brazil correspond to core regenerative tourism dimensions. These include contributions to ecological regeneration through biodiversity conservation and environmental monitoring; forms of social participation associated with community-based guiding, environmental education, and citizen-science engagement; patterns of economic value creation linked to high-value and low-volume tourism flows; and governance mechanisms that articulate tourism policy with environmental governance and territorial planning. By focusing on these dimensions, the study moves beyond a purely normative discussion of regeneration and instead assesses how regenerative outcomes are embedded in policy-supported tourism practices.

Methodologically, the study adopts a qualitative, policy-oriented analytical approach based on document analysis. The research does not generate primary empirical data but is grounded in the systematic examination and reinterpretation of secondary data derived from official public policy documents and institutional reports related to birdwatching tourism in Brazil. The primary sources include the *Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil*, published by the Brazilian Ministry of Tourism, and Embratur's institutional report *Everything about Birdwatching — Brazil*, which provide comprehensive empirical information on demand profiles, territorial distribution, governance arrangements, sectoral organization, and policy instruments relevant to birdwatching tourism.

The analytical framework is operationalized through a document-based interpretative matrix that maps empirical evidence from these policy sources against the core regenerative dimensions identified in the literature. This approach enables a structured and transparent assessment of how birdwatching tourism policies and practices align with regenerative tourism principles, while avoiding overstatement of causal relationships or direct impact measurement. By explicitly articulating its analytical logic, data sources, and interpretative categories, the study ensures methodological rigor and replicability, directly addressing critiques regarding the empirical grounding of regenerative tourism research.

## **Materials and Methods**

### ***Study Design***

This study adopts a qualitative, analytical–conceptual research design based on the examination and reinterpretation of secondary data derived from official public policy documents and institutional reports. Consistent with policy-oriented research in tourism and environmental governance, the study does not seek to generate new primary empirical data, surveys, or interviews. Instead, it produces original analytical insights by reinterpreting existing policy-generated datasets through

a regenerative tourism framework, allowing for a structured assessment of how regenerative principles are embedded in birdwatching tourism policies and practices in Brazil.

### **Data Sources**

The primary source of empirical material is the Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil, published in 2025 by the Brazilian Ministry of Tourism. This national diagnostic constitutes the most comprehensive policy-based assessment of birdwatching tourism in the country to date. According to the official methodology described in the document, the diagnosis is based on surveys conducted by the Ministry of Tourism and its technical partners with a total of 2,640 respondents, including professional ornithologists, amateur birdwatchers, tourism practitioners, and other stakeholders engaged in birdwatching tourism activities. These respondents participated in the survey as users and actors of birdwatching tourism, rather than as scientific observers conducting ornithological research.

In addition to the survey component, the national diagnosis includes the mapping of more than 300 enterprises associated with birdwatching tourism across Brazilian biomes, as well as an analysis of governance arrangements, institutional actors, and policy instruments relevant to the development of birdwatching tourism. The present study does not aim to inventory or classify individual enterprises, but uses these aggregated data to illustrate the territorial scope, sectoral organization, and institutional recognition of birdwatching tourism within national policy frameworks.

The diagnosis also incorporates information derived from citizen-science platforms commonly used in birdwatching contexts, such as *eBird* and *WikiAves*. In the present research, these platforms are not used as primary data sources. Only the validated and synthesized information already incorporated into the official policy documents is considered, acknowledging the methodological limitations associated with citizen-science data, including variability in observer expertise and potential spatial or taxonomic inaccuracies.

Complementary institutional data are drawn from Embratur's report *Everything about Birdwatching — Brazil* (2024), which provides additional empirical information on avian biodiversity, the distribution of birdwatching destinations across Brazilian biomes, the relationship between birdwatching areas and protected territories, and international air connectivity with key source markets for nature-based tourism. Peer-reviewed academic literature on regenerative tourism and birdwatching is used to support the conceptual framing and interpretation of the policy evidence.

### **Analytical Procedure**

The analytical procedure follows a structured, qualitative interpretative approach. First, core regenerative tourism dimensions are identified based on the literature, with particular attention to ecological regeneration, social participation,

economic value creation, and governance and policy integration. Second, empirical information extracted from the policy documents is systematically reclassified according to these analytical dimensions. Third, an interpretative analysis is conducted to examine how the policy-supported practices and institutional arrangements associated with birdwatching tourism correspond to regenerative tourism principles.

This procedure enables the study to bridge conceptual debates on regenerative tourism with policy-driven empirical material, without asserting causal relationships or direct impact measurement. By focusing on coherence, orientation, and institutional alignment, the analysis provides an empirically grounded assessment of birdwatching tourism as a regenerative tourism practice within a public policy context.

## Results

The results demonstrate that birdwatching tourism in Brazil operates within a quantitatively robust ecological and institutional context that supports regenerative outcomes, particularly through conservation financing, biodiversity monitoring at scale, territorial governance, and policy integration. Rather than attributing direct habitat restoration outcomes to birdwatching tourism alone, the evidence indicates that this activity contributes to regeneration through cumulative, measurable mechanisms embedded in public policy and conservation systems.

### ***Biodiversity context and conservation relevance in Brazil***

Brazil occupies a central position in global bird conservation. The country hosts approximately 1,919 to 1,971 bird species, depending on the taxonomic reference, representing one of the richest avifaunas worldwide.<sup>4</sup> At the same time, Brazil holds the highest number of globally threatened bird species in the Neotropics, with 166 species classified as globally threatened and a total of 289 species of conservation concern when near-threatened taxa are included [16]. This dual condition of exceptional biodiversity richness and high conservation risk establishes a critical ecological context within which birdwatching tourism intersects with conservation and regeneration agendas.

Importantly, biodiversity richness and conservation risk are unevenly distributed across Brazilian biomes. While the Amazon concentrates the highest number of bird species, other biomes present a disproportionately high concentration of

---

<sup>4</sup> Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025); Everything about Birdwatching — Brazil. *Brazil. Embratur*. Brasília: Brazilian Agency for International Tourism Promotion; 2024. Available from: [https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil\\_Embratur\\_E-book\\_Observacao\\_de\\_Aves\\_Maio\\_2024.pdf](https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil_Embratur_E-book_Observacao_de_Aves_Maio_2024.pdf) (accessed: 12.12.2025).

threatened taxa. As shown in Table 1 the Atlantic Forest concentrates the largest number of threatened bird species (84), followed by the Amazon (57) and the Cerrado (48), highlighting pronounced territorial asymmetries in conservation priorities across the country.

*Table 1. Distribution of bird species and threatened species across Brazilian biomes*

<b>BIOME</b>	<b>SPECIES</b>	<b>THREATENED SPECIES</b>
Amazon	1300	57
Atlantic Forest	891	84
Cerrado	837	48
Caatinga	548	24
Pantanal	582	9
Pampa	578	13
Coastal/Marine Zone	130	13

*Source:* adapted by M.R. Pisarski Jr. from P.F. Develey [16].

Conservation efforts in Brazil have produced territorially measurable outcomes. Over the last two decades, targeted conservation initiatives resulted in the creation of approximately 79,500 hectares of protected areas specifically aimed at safeguarding highly threatened bird species. In addition, 237 Important Bird and Biodiversity Areas (IBAs) have been identified nationwide, with 123 sites (approximately 52%) located in the Atlantic Forest, reflecting the spatial concentration of threatened species and conservation priorities in this biome [16]. These protected and priority areas constitute the landscapes where birdwatching tourism is predominantly practiced, reinforcing the ecological embeddedness of the activity.

### **Conservation financing and economic mechanisms supporting regeneration**

Quantitative evidence from conservation finance literature demonstrates that tourism constitutes a significant funding mechanism for bird conservation. A global assessment of 562 threatened bird species identified reliable financial data for 90 species (16%), within which tourism-derived revenues accounted for 10 to 64% of total conservation funding, particularly in regions such as South America and Africa [10]. The dependence on tourism revenue was statistically higher for critically endangered species compared to endangered species ( $p < 0.02$ ) [10]. These findings provide a measurable basis for interpreting birdwatching tourism as an indirect but quantifiable contributor to conservation financing and, by extension, regenerative ecological processes.

While Brazilian public policy documents do not disaggregate conservation financing exclusively by tourism segment, the national diagnostic indicates that birdwatching tourism is framed as a high-value, low-volume activity, strategically positioned to generate economic incentives compatible with conservation

objectives<sup>5</sup>. This orientation aligns with broader regenerative tourism frameworks that emphasize quality over quantity and long-term ecosystem vitality rather than short-term visitor growth [1; 3; 5].

### **Biodiversity monitoring and citizen science at scale**

One of the most quantitatively significant regenerative mechanisms associated with birdwatching tourism is biodiversity ... monitoring through citizen science (illustrated in Figure 3). The eBird platform exemplifies the scale of this contribution. By 2013, eBird had accumulated over 140 million bird occurrence records, submitted by approximately 150,000 observers, who collectively invested 10.5 million hours in field data collection. Over a ten-year period, data submissions increased at an annual rate of 30–40%, demonstrating exponential growth in monitoring capacity [14]. These datasets are now routinely used in species distribution modeling, conservation planning, and biodiversity assessments.



**Figure 3.** Citizen science group focused on birdwatching

Source: Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/aceso-a-informacao/aco-es-e-programas/programas-projetos-aco-es-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/aceso-a-informacao/aco-es-e-programas/programas-projetos-aco-es-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

<sup>5</sup> Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/aceso-a-informacao/aco-es-e-programas/programas-projetos-aco-es-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/aceso-a-informacao/aco-es-e-programas/programas-projetos-aco-es-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

In Brazil, citizen science participation has expanded substantially. Estimates indicate that between 30,000 and 40,000 Brazilian birdwatchers actively contribute to observation and monitoring activities, including platforms such as eBird and WikiAves [16]. WikiAves alone documents nearly the full national avifauna, with records covering approximately 1,964 bird species, supported by millions of photographic and acoustic records generated by observers across all biomes<sup>6</sup> [16]. Although individual citizen-science records may present variability in precision, their aggregation within policy and scientific frameworks significantly enhances spatial and temporal coverage of biodiversity monitoring.

### **National policy scale and institutionalization of birdwatching tourism**

The national scale of birdwatching tourism in Brazil is evidenced by official public policy instruments. The Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil is grounded in a survey of 2,640 respondents, encompassing professional ornithologists, amateur birdwatchers, tourism practitioners, and other stakeholders engaged in birdwatching tourism. In addition, the diagnosis mapped 308 birdwatching-related enterprises distributed across Brazilian territories and biomes, illustrating the sector's geographic reach and institutional recognition.<sup>7</sup>

Although the diagnosis does not quantify direct ecological regeneration outcomes, it provides robust empirical evidence of participation, territorial distribution, governance arrangements, and policy instruments. These elements constitute essential enabling conditions for regenerative outcomes, particularly when aligned with conservation policies and protected-area management frameworks.

### **Brazilian regenerative initiatives with quantified ecological outcomes**

Brazilian literature on regenerative tourism provides further quantitative evidence linking tourism to ecological restoration. A case study of the Biofábrica de Corais in Porto de Galinhas reports the regeneration of 2,580 coral fragments, with an estimated survival rate of approximately 80%, supported by systematic monitoring and traceability mechanisms [6]. This marine ecosystem case

---

<sup>6</sup> Everything about Birdwatching — Brazil. *Brazil. Embratur*. Brasília: Brazilian Agency for International Tourism Promotion; 2024. Available from: [https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil\\_Embratur\\_E-book\\_Observacao\\_de\\_Aves\\_Maio\\_2024.pdf](https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil_Embratur_E-book_Observacao_de_Aves_Maio_2024.pdf) (accessed: 12.12.2025).

<sup>7</sup> Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

demonstrates that tourism-linked initiatives in Brazil can generate explicit ecological restoration outcomes when integrated with governance, scientific monitoring, and community engagement.

A broader exploratory study of regenerative tourism initiatives in Brazil analyzed four cases and reported quantified territorial scales for three of them: 6,000 hectares (Comuna do Ibitipoca), 484 hectares (Fazenda Escola Bona Esperança), and 129 hectares (Instituto Terra Luminous) [17]. While these cases do not consistently measure biodiversity recovery through standardized ecological indicators, they illustrate that regenerative tourism initiatives in Brazil may operate at meaningful territorial scales, reinforcing the relevance of governance and land management as regenerative dimensions.

### Governance, connectivity, and long-term ecological resilience

From a landscape-scale perspective, evidence from conservation science highlights the importance of governance and connectivity for regenerative outcomes. Empirical analyses demonstrate that conservation strategies prioritizing ecological connectivity significantly improve biodiversity persistence and fisheries conservation outcomes across large territorial systems [7; 8]. Complementary research on natural forest regeneration in the Brazilian Amazon indicates that regeneration outcomes are strongly conditioned by institutional coordination, policy coherence, and long-term governance capacity rather than by isolated interventions [9].

Taken together, the results demonstrate that birdwatching tourism in Brazil operates within a quantitatively robust ecological and institutional context, characterized by measurable contributions to conservation financing, large-scale biodiversity monitoring, and territorially embedded policy instruments. While direct ecological restoration metrics are not consistently available for birdwatching tourism, the evidence documents multiple quantifiable mechanisms through which this activity supports regenerative-oriented outcomes within public policy frameworks. The main quantitative indicators supporting these findings are summarized in Table 2.

Table 2. Indicators relating birdwatching tourism to biodiversity and regenerative dimensions

Regenerative dimension	Indicator	Quantitative evidence	Source
Biodiversity context (Brazil)	National bird species richness	1,919–1,971 bird species recorded in Brazil, representing one of the richest avifaunas globally*	[16]
Species conservation status	Birds of conservation concern	166 globally threatened species; 289 species of conservation concern (threatened + near threatened)	[16]
Protected areas and priority sites	Areas designated for bird conservation	79,500 hectares of protected areas created in the last 20 years specifically to protect threatened birds; 237 IBAs mapped nationwide, 123 (~52%) in the Atlantic Forest	[16]

Table 2, ending

Regenerative dimension	Indicator	Quantitative evidence	Source
Conservation financing	Tourism contribution to bird conservation funding	Financial data available for 90 of 562 threatened species (16%); tourism accounts for 10–64% of conservation funding, with higher dependence for critically endangered species ( $p < 0.02$ )	[10]
Biodiversity monitoring (global)	Scale of citizen-science bird records (eBird)	>140 million bird observations, 150,000 observers, 10.5 million hours of field effort; annual growth of 30–40% over a decade	[14]
Biodiversity monitoring (Brazil)	Civil participation in bird observation	Estimated 30,000–40,000 Brazilian birdwatchers contributing to platforms such as eBird and WikiAves	[16]
National policy scale (Brazil)	Participation in birdwatching tourism diagnostics	2,640 survey respondents involved in national policy assessment	**
Territorial economic footprint	Birdwatching-related enterprises	308 enterprises mapped across Brazilian biomes	***
Direct ecological restoration (Brazil, marine)	Tourism-linked restoration outputs	2,580 coral fragments regenerated with approximately 80% survival rate	[6]
Territorial scale of regenerative initiatives (Brazil)	Area covered by selected regenerative tourism cases	4 cases analyzed; reported areas of 6,000 ha, 484 ha, and 129 ha	[17]
Landscape-scale resilience	Effect of ecological connectivity	Conservation strategies prioritizing connectivity significantly improve biodiversity persistence and fisheries outcomes at large territorial scales	[8]
Governance and regeneration	Conditions for natural ecosystem regeneration	Forest regeneration outcomes strongly conditioned by policy coherence, institutional coordination, and governance capacity	[9]

\*Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025); Everything about Birdwatching — Brazil. *Brazil. Embratur*. Brasília: Brazilian Agency for International Tourism Promotion; 2024. Available from: [https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil\\_Embratur\\_E-book\\_Observacao\\_de\\_Aves\\_Maio\\_2024.pdf](https://embratur.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Brasil_Embratur_E-book_Observacao_de_Aves_Maio_2024.pdf) (accessed: 12.12.2025).

\*\*Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

\*\*\*Diagnosis of Public Policies for Birdwatching Tourism in Brazil. *Brazil. Ministry of Tourism*. Brasília: Ministry of Tourism; 2025. 116 p. Available from: [https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves\\_112025.pdf](https://www.gov.br/turismo/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/produtos-e-experiencias-turisticas/turismo-de-aves/diagnostico-de-politicas-publicas-turismo-de-observacao-de-aves_112025.pdf) (accessed: 12.12.2025).

Source: compiled by M.R. Pisarski Jr.

## Discussion

The results of this study invite a broader reflection on how regenerative tourism should be interpreted in biodiversity-rich and policy-intensive contexts such as Brazil. Rather than framing regeneration as a direct or immediately measurable ecological outcome attributable to tourism activities, the Brazilian case suggests

that regenerative potential emerges through structural and cumulative mechanisms embedded in governance, conservation finance, and knowledge systems.

The ecological context in which birdwatching tourism operates in Brazil is marked by a pronounced imbalance between biodiversity richness and conservation risk. The coexistence of one of the world's richest avifaunas with a disproportionately high number of threatened species indicates that conservation challenges are not uniformly distributed across space. This unevenness reinforces the argument that regenerative tourism cannot be approached through generic or homogeneous strategies. Instead, tourism practices intersect with conservation priorities in territorially differentiated ways, shaped by historical land-use patterns, institutional capacity, and policy focus. In this sense, birdwatching tourism is better understood as a practice operating within priority conservation landscapes, rather than as a driver of ecological change in isolation.

From an economic perspective, the discussion of conservation financing provides an important interpretative lens. Evidence indicating that tourism revenues can constitute a substantial share of conservation funding for threatened bird species highlights a tangible mechanism through which bird-oriented tourism may support biodiversity protection. Although these financial contributions cannot be directly quantified for Brazil using the available policy data, their documented relevance in comparable contexts underscores the potential of birdwatching tourism to function as a stabilizing element within conservation funding structures. Regeneration, in this view, is linked less to physical restoration metrics and more to the continuity and reliability of resources that sustain conservation efforts over time.

Another central aspect concerns biodiversity monitoring and the role of citizen participation. The scale of observational data generated through birdwatching-related citizen science represents a qualitative shift in conservation knowledge systems. When tens of thousands of observers contribute to large, structured databases, biodiversity monitoring becomes more continuous, spatially extensive, and socially embedded. Beyond their scientific utility, these practices foster learning, environmental awareness, and stewardship, reinforcing the social foundations of conservation. From a regenerative tourism perspective, such processes contribute to the regeneration of relationships between society and ecosystems, an aspect often overlooked in conventional impact assessments.

The institutionalization of birdwatching tourism within Brazilian public policy further strengthens its regenerative orientation. National diagnostics, strategic planning instruments, and international promotion initiatives signal that birdwatching is no longer treated as an informal or marginal activity. While these policy instruments do not measure ecological regeneration directly, they document the organizational and governance conditions under which regenerative dynamics may occur. The alignment between tourism development, conservation objectives, and territorial planning reduces the likelihood of tourism-induced ecological pressure and increases the potential for positive feedback between local economies and conservation outcomes.

Brazilian experiences of regenerative tourism that report explicit ecological restoration outcomes, such as coral regeneration initiatives, offer additional interpretative insights. These cases demonstrate that tourism can be associated with measurable ecological change when embedded within robust governance frameworks, scientific monitoring, and community engagement. At the same time, the diversity of territorial scales and measurement approaches observed across Brazilian initiatives highlights the limitations of expecting standardized restoration indicators across all tourism contexts. This reinforces the relevance of policy-oriented and system-level analyses for understanding regeneration in tourism.

Finally, insights from conservation science emphasize that long-term ecological resilience depends on landscape connectivity, institutional coordination, and adaptive governance. Regeneration, whether of forests, reefs, or biodiversity systems, is shaped by multi-level policy coherence rather than isolated interventions. When birdwatching tourism operates within such connected and governed landscapes, its contribution to regeneration is indirect but potentially significant, reinforcing conservation priorities, supporting monitoring infrastructures, and aligning economic activity with long-term ecological objectives.

Taken together, the discussion suggests that birdwatching tourism in Brazil exemplifies a form of regenerative tourism not because it directly restores ecosystems, but because it strengthens the systems that enable regeneration. This interpretation advances regenerative tourism research by grounding the concept in empirical policy evidence and by highlighting the importance of governance, participation, and territorial context in shaping tourism's regenerative potential in megadiverse countries.

## Conclusion

This study examined birdwatching tourism in Brazil through the lens of regenerative tourism, using national public policy evidence as its primary analytical foundation. By reinterpreting official diagnostic data and institutional documents, the research contributes to ongoing debates on how regenerative tourism can be empirically assessed beyond localized case studies or purely conceptual discussions.

The analysis demonstrates that birdwatching tourism in Brazil cannot be understood as a regenerative practice based on direct or immediate ecological restoration outcomes. Instead, its regenerative potential lies in the way it strengthens the systems that enable regeneration over time. These systems include conservation financing mechanisms, large-scale biodiversity monitoring through citizen science, institutionalized governance arrangements, and territorial planning aligned with biodiversity conservation priorities. When considered together, these elements reveal how tourism can support long-term ecological resilience without necessarily functioning as a restoration intervention in itself.

By grounding the discussion in public policy evidence, this study advances regenerative tourism research in two important ways. First, it shows that regeneration

can be analytically identified at broader territorial and governance scales, rather than being restricted to site-specific projects with explicit restoration metrics. Second, it highlights the central role of governance, participation, and policy coherence in shaping tourism’s regenerative potential, particularly in megadiverse countries where conservation challenges are spatially uneven and institutionally complex.

In this sense, birdwatching tourism in Brazil exemplifies a form of regenerative tourism not because it directly restores ecosystems, but because it contributes to maintaining and reinforcing the social, institutional, and ecological conditions under which regeneration becomes possible. This perspective underscores the importance of integrating tourism development with conservation policy and knowledge systems, offering a more realistic and scalable understanding of regeneration in tourism contexts.

Future research could build on this approach by combining policy-based analyses with longitudinal ecological and socio-economic indicators, enabling a more precise assessment of how tourism-related governance mechanisms influence regeneration trajectories over time. Such efforts would further strengthen the empirical foundations of regenerative tourism and support its application in biodiversity-rich regions facing complex development and conservation challenges.

## References

- [1] Bellato L, Pollock A. Regenerative tourism: a state-of-the-art review. *Tourism Geographies*. 2025;27(3–4):558–567. <https://doi.org/10.1080/14616688.2023.2294366>
- [2] Duxbury N, Bakas FE, Vinagre de Castro T, Silva S. Creative tourism development models towards sustainable and regenerative tourism. *Sustainability*. 2021;13(1):2. <https://doi.org/10.3390/su13010002>
- [3] Becken S, Kaur J. Anchoring “tourism value” within a regenerative tourism paradigm — a government perspective. *Journal of Sustainable Tourism*. 2022;30(1):52–68. <https://doi.org/10.1080/09669582.2021.1990305> EDN: TEKAVW
- [4] Wahl DC. *Designing regenerative cultures*. Axminster: Triarchy Press; 2016.
- [5] Dredge D. Regenerative tourism: transforming mindsets, systems and practices. *Journal of Tourism Futures*. 2022;8(3):269–281. <https://doi.org/10.1108/JTF-01-2022-0015> EDN: KVCTWW
- [6] Silva TPG, Nascimento FG, Silva JA, Soares AMC. Turismo regenerativo: uma análise da atuação da Biofábrica de Corais em Porto de Galinhas/PE. *Caderno Virtual de Turismo*. 2025;25(2):51–75. <https://doi.org/10.18472/cvt.25n2.2025.2233> EDN: KQWIDO
- [7] Nivoloni GT. *Regenerative tourism in the state of São Paulo: a perspective beyond sustainability*. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2021.
- [8] Fontoura L, D’agata S., Gamoyo M., Barneche D.R., Luiz O.J., Madin E.M.P., Eggertsen L., Maina J.M. Protecting connectivity promotes successful biodiversity and fisheries conservation. *Science*. 2022;375(6578):336–340. <https://doi.org/10.1126/science.abg4351> EDN: NJOPKV
- [9] Vieira ICG, Giles A, do Espírito Santo MM, Mesquita RCG, Vieira DLM, Massoca P, Rosenfield MF, Albernaz ALM, De Almeida DRA, Vieira G, Schiatti Ju, Ferreira M, Brancalion PHS, Jakovac CC. Governance and policy constraints of natural forest

- regeneration in the Brazilian Amazon. *Restoration Ecology*. 2025;33(1):e14272. <https://doi.org/10.1111/rec.14272> EDN: TGYTYQ
- [10] Steven R, Castley JG, Buckley R. Tourism revenue as a conservation tool for threatened birds in protected areas. *PLoS One*. 2013;8(5):e62598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062598> EDN: RIZQKD
- [11] Şekercioglu ÇH. Impacts of birdwatching on human and avian communities. *Environmental Conservation*. 2002;29(3):282–289. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000206> EDN: ECKNZD
- [12] Alves KL, Fonseca-Filho RE. Birdwatching and environmental education: perceptions of public school students in Uberlândia, Brazil. *Revista Turydes: Turismo y Desarrollo*. 2020;(28). <http://hdl.handle.net/20.500.11763/turydes28birdwatching>
- [13] Steven R, Morrison C, Castley JG. Birdwatching and avitourism: a global review of research into its participant markets, distribution and impacts, highlighting future research priorities to inform sustainable avitourism management. *Journal of Sustainable Tourism*. 2015;23(8–9):1257–1276. <https://doi.org/10.1080/09669582.2014.924955>
- [14] Sullivan BL, Aycrigg JL, Barry JH, Bonney RE, Bruns N, Cooper CB et al. The eBird enterprise: an integrated approach to development and application of citizen science. *Biological Conservation*. 2014;169:31–40. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.003>
- [15] Biggs D, Ban NC, Hall CM. Lifestyle values, resilience, and nature-based tourism’s contribution to conservation on Australia’s Great Barrier Reef. *Environmental Conservation*. 2012;39(4):370–379. <https://doi.org/10.1017/S0376892912000239>
- [16] Develey PF. Bird Conservation in Brazil: Challenges and practical solutions for a key megadiverse country. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2021;19(2):171–178. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.02.005> EDN: LUCOVB
- [17] Rocha Pereira DR, de Araújo TFA, Fontes CLA, de Andrade Spinola C. Regenerative tourism experiences in Brazil: an exploratory study. *RITUR — Revista Iberoamericana de Turismo*. 2024;14(1):90–107. <https://doi.org/10.28998/10.28998/RITURitur.V14.N1.A17182pp.90-10717182> EDN: JPXIDC

### Bio note:

Marcos R. Pisarski Jr., Researcher at Itaipu Parquetec (Itaipu Technology Park Foundation — Brazil) and Member of Brazil’s National Tourism Council. PhD candidate at the University of Guadalajara (Mexico) and Professor at Goiás State University (Brazil). Itaipu Parquetec, Sustainable Tourism Laboratory, 6731, Tancredo Neves Avenue, 85867-900, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil. ORCID: 0000-0002-8384-7420; eLIBRARY SPIN-code: 9538-2861. E-mail: marcos.pisarski@gmail.com

### Сведения об авторе:

Маркус Р. Писарски мл., исследователь Итаипу Паркетек (Фонд Технологического парка Итаипу — Бразилия) и член Национального совета по туризму Бразилии. Аспирант (PhD candidate) Университета Гвадалахары (Мексика) и профессор Государственного университета Гояса (Бразилия). Итаипу Паркетек, Лаборатория устойчивого туризма, проспект Танкранду Невиса, 6731, 85867-900, Фос-ду-Игуасу, штат Парана, Бразилия. ORCID: 0000-0002-8384-7420; eLIBRARY SPIN-код: 9538-2861. E-mail: marcos.pisarski@gmail.com

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ INDUSTRIAL ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-275-292

EDN: OZQEPJ

УДК 628.2:626.8

Научная статья / Research article

### Совершенствование метода очистки сточных вод от загрязнений растительно-животного происхождения

С.Б. Кунденок , В.Н. Волкова , Д.Л. Марков ,  
А.С. Финкельштейн , И.М. Казанцев  

*Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток, Российская  
Федерация*

✉ [kazantcev.im@dvfu.ru](mailto:kazantcev.im@dvfu.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены анализ воздействующих факторов и совершенствование технологии очистки вод производства порошковой витаминизированной смеси на основе соевого и молочного белка. Проведена серия лабораторных испытаний коагуляционного выделения загрязнений из раствора в осадок. Разработано инновационное решение физико-химической обработки стока с использованием технической соды и морской соли. Экспериментально выявлен температурный фактор хлопьеобразования и установлено, что при температуре выше 46 °С происходит формирование казеинового сгустка, который усложняет работу флотационной установки. По итогам исследований авторами статьи разработаны мероприятия и технологические решения проектирования цеховых очистных сооружений, включающих усреднитель индивидуальной конструкции, обеспечивающий температурный фактор коагуляции, реагентный флотатор и узел обработки флотопены и осадка. Разработанный физико-химический способ очистки представляет собой оптимальное и экономически целесообразное технологическое решение для локальных сооружений, обеспечивающее необходимую степень извлечения загрязнений до норм на сброс в сети городской канализации при резко изменяющихся параметрах сточных вод в течение рабочей смены, а выделенные из раствора белки не содержат солей алюминия или железа и могут быть использованы в приготовлении грунта для озеленения после обеззараживания.

**Ключевые слова:** молоко, соя, порошковый концентрат, промышленные сточные воды, локальные очистные сооружения, температура коагуляции, природные реагенты

**Вклад авторов.** Кунденок С.Б., Волкова В.Н. — концептуализация, постановка задачи исследования, разработка технологической схемы. Кунденок С.Б., Волкова В.Н., Марков Д.Л., Финкельштейн А.С., Казанцев И.М. — проведение исследования, подготовка статьи к публикации. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Кунденок С.Б., Волкова В.Н., Марков Д.Л., Финкельштейн А.С., Казанцев И.М., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Заявление о доступности данных.** Все проведенные авторами исследования и их результаты представлены в статье.

**История статьи:** поступила в редакцию 15.06.2025; доработана после рецензирования 06.12.2025; принята к публикации 02.02.2026.

**Для цитирования:** Кунденок С.Б., Волкова В.Н., Марков Д.Л., Финкельштейн А.С., Казанцев И.М. Совершенствование метода очистки сточных вод от загрязнений растительно-животного происхождения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 275–292. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-275-292> EDN: OZQEPJ

## Improving the method of wastewater treatment from plant-animal pollutants

Svetlana B. Kundenok , Vladislava N. Volkova , Danil L. Markov ,  
Artem S. Finkelshtein , Ilya M. Kazantsev  

*Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, Russian Federation*

 [kazantsev.im@dvfu.ru](mailto:kazantsev.im@dvfu.ru)

**Abstract.** The research paper examines the analysis of factors involved and the improvement of water purification technology for the production of powdered fortified mixture based on soybean and milk protein. A series of laboratory tests of coagulation release of contaminants from solution to sediment was carried out. An innovative solution has been developed for the physico-chemical treatment of wastewater using technical soda and sea salt. The temperature factor of flocculation has been determined experimentally, and it has been established that at temperatures above 46°C, a casein clot is formed, which complicates the operation of the flotation plant. Based on the results of the research, the authors of the article have developed measures and technological solutions for the design of workshop sewage treatment plants, including an individual design average that provides a temperature coagulation factor, a reagent flotation device and a flotation foam and sludge treatment unit. The developed physico-chemical purification method is an optimal and economically feasible technological solution for local facilities, providing the necessary degree of pollution extraction prior to discharge into the urban sewer network with dramatically changing wastewater parameters during the work shift, and the proteins isolated from the solution do not contain aluminum or iron salts and can be used in soil preparation. for landscaping after disinfection.

**Keywords:** milk, soy, powdered concentrate, industrial wastewater, local wastewater treatment plants, coagulation temperature, natural reagents

**Authors' contribution.** *S.B. Kundenok, V.N. Volkova* — conceptualization, formulation of research problems, development of a technological scheme; *S.B. Kundenok, V.N. Volkova, D.L. Markov, A.S. Finkelshtein, I.M. Kazantsev* — conducting research, preparing an article for publication. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Data availability statement.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history:** received 15.06.2025; revised 06.12.2025; accepted 02.02.2026.

**For citation:** Kundenok SB, Volkova VN, Markov DL, Finkelshtein AS, Kazantsev IM. Improving the method of wastewater treatment from plant-animal pollutants. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):275–292. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-275-292> EDN: OZQEPJ

## Введение

Очистка промышленных сточных вод является одной из важнейших задач современной экологической инженерии. В условиях постоянного ужесточения требований к качеству обработки вод особое внимание уделяется разработке и совершенствованию эффективных технологических решений.

Особенностью сточных вод производства продуктов питания являются колебания концентраций загрязнений и расхода воды в течение рабочей смены, которые необходимо учитывать при организации процессов водоочистки, это требует предпроектных научных исследований в целях обеспечения экономической целесообразности строительных и эксплуатационных затрат. В табл. 1 представлены исходные показатели сточных вод производства белкового концентрата растительного происхождения.

Таблица 1. Показатели сточных вод до очистки

№	Показатели	Исходные сточные воды	Требования к загрязнению на сброс в сети городской канализации
1	Водородный показатель pH, ед.	6–7,8	6,5–8,5
2	БПК <sub>5</sub> , мг/л	931 ± 16,8	180 ± 18
3	Взвешенные вещества, мг/л	1081 ± 3,8	265,0 ± 26,5
4	Жиры, мг/л	13,0 ± 1,12	12,9 ± 2,5
5	Фосфаты, мг/л	29,42 ± 2,34	2,5 ± 0,2
6	Аммоний солевой, мг/л	21 ± 3,34	11,2 ± 1,5
7	Максимальный / минимальный часовой расход сточных вод, м <sup>3</sup>	30 / 5	–
8	Среднесуточный расход сточных вод, м <sup>3</sup>	205	–

Источник: составлено С.Б. Кунденюк, В.Н. Волковой, Д.Л. Марковым, А.С. Финкельштейн, И.М. Казанцевым.

Table 1. Indicators of wastewater before treatment

No.	Indicators	Source wastewater	Pollution requirements for discharge into the urban sewerage network
1	Hydrogen pH, units.	6–7.8	6.5–8.5
2	BPK5, mg/l	931 ± 16.8	180 ± 18
3	Suspended solids, mg/l	1081 ± 3.8	265.0 ± 26.5
4	Fats, mg/l	13.0 ± 1.12	12.9 ± 2.5
5	Phosphates, mg/l	29.42 ± 2.34	2.5 ± 0.2
6	Ammonium salt, mg/l	21 ± 3.34	11.2 ± 1.5
7	Maximum / minimum hourly wastewater consumption, m <sup>3</sup>	30 / 5	–
8	Average daily waste water consumption, m <sup>3</sup>	205	–

Source: compiled by S.B. Kundenok, V.N. Volkova, D.L. Markov, A.S. Finkelshtein, I.M. Kazantsev.

Применение биологического метода для локальной очистки сточных вод в условиях пищевой промышленности, в том числе производства белковой смеси, демонстрирует ограниченную эффективность по следующим причинам [1]:

- нестабильность и высокие показатели загрязнений затрудняют поддержание оптимального режима биодеградации;
- колебания расхода воды нарушают работу биоценоза;
- наличие активного ила или биопленки сооружений водоочистки на территории предприятия представляет дополнительные риски для выпускаемых продуктов питания;
- площадь застройки необходима больше, чем для коагуляционного метода;
- экономическая затратность создания и эксплуатации биологических очистных сооружений.

Реагентная обработка цехового стока производства продуктов питания является приоритетным способом водоочистки после механической стадии обработки и обладает следующими преимуществами:

- высокая эффективность удаления мелкодисперсных и коллоидных примесей;
- стабильность процесса при колебаниях показателей загрязнения;
- экономическая целесообразность применения;
- возможность автоматизации технологического процесса.

Для обработки сточных вод пищевых производств с середины двадцатого века применяются напорные реагентные флотаторы<sup>1</sup>, где хлопья разделяются на две фракции: флотопену и оседающий осадок, при этом конструкция

<sup>1</sup> Авт. свидетельство SU 966020 A1, СССР. Флотационный аппарат для реагентной очистки сточных вод : заявл. 27.03.1981 ; опубл. 15.10.1982 / Соловей В.Н., Ободовский Г.А., Волочач С.В. ; заявитель и патентообладатель : Харьковский ордена Ленина политехнический институт им. В.И. Ленина.

устройства постоянно совершенствуется с учетом современных экологических требований к качеству очистки промышленных стоков. Для более эффективного извлечения взвешенных веществ после флотации применяют осаждение в наклонных модулях<sup>2</sup>. Например, в Японии получили распространение тонкослойные отстойники с гофрированными блоками из полимерных материалов, а фирма «Дегремон» выпускает отстойники с трубчатыми блоками RPS<sup>3</sup>. В отличие от флотаторов режим работы тонкослойного отстойника моделирует естественный процесс седиментации, но в сооружениях такого типа сложно обеспечить распределение движения жидкости между ярусами наклонных элементов [2]. Равномерного распределения воды удается достичь при перекрестном движении воды и осадка. Опыт применения флотации в сочетании с тонкослойным отстаиванием показал высокую эффективность способа извлечения загрязнений для сточных вод пищевой промышленности [3–4].

Обработка воды реагентами — самый распространенный метод водоподготовки для удаления грубодисперсных, коллоидных и растворенных примесей<sup>4</sup> [5]. Теоретические основы процесса коагуляции воды формировались на протяжении многих десятилетий благодаря фундаментальным исследованиям и широко рассмотрены в работах зарубежных и отечественных ученых: М. Смолуховского, Б.В. Дерягина, Л.Д. Ландау, Э. Фервея, Дж.Т. Овербека, Е.Д. Бабенкова. Физико-химическая очистка сточных вод в научных публикациях и учебниках рассматривается в основном по видам сточных вод и в сочетании с другими методами [6, с. 70; 7–9].

Процесс коагуляции включает в себя несколько стадий: химическое растворение реагента, физико-химическое взаимодействие между примесями и продуктами гидролиза. В процессе коагуляции из сточных вод удаляются взвешенные вещества, коллоидные загрязнения, некоторые растворенные загрязнения, вещества, обладающие поверхностно-активными свойствами, практически все формы фосфора, частично азот, тяжелые металлы. Применение минеральных коагулянтов в сочетании с флокулянтами позволяет интенсифицировать извлечение загрязнений из стоков.

Основные применяемые коагулянты в водоочистке представлены солями железа и алюминия, образованными сильными кислотами, при этом недо-

<sup>2</sup> Патент RU 2263636C2, С 02 F 1/24, В 03D 1/14. Флотатор : заявл. 02.12.1997 ; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31 / Бочкарев Г.Р., Кондратьев С.А.; заявитель и патентообладатель : Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН) (RU).

<sup>3</sup> Патент RU 206504 U1, C02F 1/465, C02F 1/24, B03D 1/14, C02F 103/20, C02F 103/16. Флотатор : заявл. 07.06.2021 ; опубл. 14.09.2021 / Киров Ю.А., Котов Д.Н. Савельев Ю.А., Киров В.А., Кирова Ю.З., Королев П.А., Сычев А.С. ; заявитель и патентообладатель : федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аграрный университет» (RU).

<sup>4</sup> Серпокровлов Н.С., Вильсон Е.В., Гетманцев С.В., Марочкин А.А. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. С. 77, 162.

статочно используются композитные составы, включающие соли калия, кальция и магния. Выбор коагулянта осуществляется с учетом таких факторов, как химический состав самого реагента, свойства и качество обрабатываемой воды, значение рН сточной воды. Водородный показатель раствора играет ключевую роль в процессе гидролиза солей металлов. Важно учитывать, что допустимый диапазон рН для очищенных сточных вод составляет 6,5–8,5, кислые коагулянты (например,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , полиоксихлорид алюминия) при диссоциации выделяют ион  $\text{H}^+$ , а щелочные (алюминат натрия), являясь солями сильных оснований и слабых кислот, выделяют ион  $\text{OH}^-$ .

Основные факторы, оказывающие влияние на эффективность извлечения загрязнений из вод: доза реагента, щелочность сточных вод, исходный состав воды по содержанию анионов (анионы по степени влияния на коагуляцию можно расположить в следующей последовательности:  $(\text{Cl}^- < \text{HCO}_3^- < \text{SO}_4^{2-})$ , наличие взвешенных веществ (центров хлопьеобразования), интенсивность смешения стоков с реагентами (необходимо обеспечить равномерное распределение реагента в течение 1–2 минут), перемешивание (оказывает влияние на турбулентную и градиентную коагуляцию) и температура. В контексте нашего исследования температурный фактор приобретает особую значимость, поскольку при превышении порога в 46 °С наблюдается критическое изменение процесса коагуляции: вместо формирования хлопьевидных агрегатов происходит образование казеинового сгустка.

Для повышения эффективности реагентной очистки сточных вод широко применяются два основных метода:

- коагуляция — процесс укрупнения взвешенных частиц;
- корректировка рН — регулирование кислотно-щелочного баланса среды.

Избыточный щелочной резерв необходим, чтобы диссоциация вводимых в стоки коагулянтов прошла в полном объеме, а синтетические или органические флокулянты добавляют для укрупнения хлопьев, образовавшихся в результате гидролиза солей металлов.

Таким образом, реагентная обработка представляет собой сложный технологический процесс, требующий тщательного подбора коагулянтов и учета всех факторов для достижения максимальной эффективности извлечения загрязнений различной степени дисперсности при изменяющихся параметрах сточных вод. При выборе реагентов необходимо учитывать не только информацию о производителе, данные сертификатов качества, стоимость продукции, но и комплексный анализ всех технологических параметров процесса очистки и возможность утилизации осадков.

Цель исследования — разработка способа и конструкторско-технологических решений цеховых очистных сооружений выделения белков в осадок и флотопену.

## Материалы и методы

Основной задачей данного этапа экспериментальных исследований является определение предельных температурных параметров, при которых возможно эффективное реагентное осаждение загрязняющих веществ в сточных водах, образующихся в процессе санитарной обработки технологического оборудования.

Объектом исследования выступают сточные воды, формирующиеся при санитарной обработке производственного оборудования, задействованного в процессе производства пищевого концентрата на основе витаминизированного белка растительно-животного происхождения.

Особое внимание в рамках исследования уделено процессам, протекающим на этапе до формирования казеинового сгустка. Данный период характеризуется начальной стадией коагуляции белков, взаимодействием реагентов с загрязняющими веществами, формированием первичных агрегатов и изменениями физико-химических характеристик системы.

Практическая ценность работы определяется возможностью:

- определения оптимальных температурных режимов очистки;
- повышения эффективности процесса осаждения;
- минимизации негативного воздействия на окружающую среду;
- оптимизации технологических параметров очистки.

Ожидаемые результаты:

- установление предельных температурных границ процесса;
- определение влияния температуры на эффективность осаждения;
- разработка технологической схемы процесса очистки.

Таким образом, данное исследование направлено на решение важной научно-практической задачи определения температурных параметров реагентного осаждения загрязняющих веществ в специфических стоках производства пищевого концентрата на основе витаминизированного белка.

Использование морской воды [10], где концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  достигает 0,45 мг/л, а  $\text{Cl}^-$  — 19,3 мг/л, совместно с сульфатом алюминия предлагается для очистки поверхностных сточных вод, содержащих фенолы, а в пищевой промышленности для хлопьеобразования молочных белков в редких случаях применяют химическую коагуляцию хлоридом кальция<sup>5</sup>. Основываясь на этих данных, в настоящем исследовании продолжено изучение коагулирующих свойств морской воды [11] применительно к сточным водам с высоким содержанием белков.

Сравнение режимов обработки сточных вод проведено по классической методике пробного коагулирования. Для обработки и контроля результатов применялись оперативные аналитические методики. Содержание взвешен-

<sup>5</sup> Патент RU 2715596 C2. МПК A23J 1/14, A23J 3/14. Получение белкового продукта из бобовых с применением экстракции хлоридом кальция : заявл. 27.11.2016 ; опублик. 02.03.2020. Бюл. № 33 / Сигалл Кевин И., Швайцер Мартин; заявитель и патентообладатель : Баркон Ньютрасайнс (МБ) корп. (СА).

ных веществ (ВЗВ) определялось способом гравиметрического осаждения. Биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) измерялось с использованием йодометрического метода Винклера<sup>6</sup>.

Для количественной оценки изменений гранулометрического состава взвешенных частиц до и после коагуляции образцы частиц отбирались в пяти повторностях и анализировались на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec plus (Fritsch, Германия). Данный прибор обладает универсальностью и предназначен для определения размеров частиц в диапазоне от 0,01 до 2000 мкм, включая нанометровый масштаб. Принцип работы анализатора основан на дифракции полупроводникового лазерного излучения (зеленый свет, длина волны 532 нм, мощность 7 мВт) на дисперсных образцах. При взаимодействии лазерного луча с частицей происходит ее дифракционное рассеяние под углом, зависящим от размера частицы. Рассеянный свет фиксируется многоэлементным детектором, а интенсивность сигнала на каждом элементе подвергается математической обработке в соответствии с теорией Ми, учитывающей как рассеяние, так и прохождение излучения через частицу [12]. Такой подход обеспечивает повышенную точность определения размера и формы частиц в условиях сложной дисперсной среды.

## Результаты и обсуждение

Широко распространенная технология локальной очистки стоков производства продуктов питания включает очистное оборудование: барабанную решетку, усреднитель, оборудованный системой механического перемешивания, и реагентный напорный флотатор. После механической и физико-химической очистки очищенные сточные воды самотеком отводятся через городскую канализацию на станцию биологической очистки.

Для подтверждения предположения, что добавление морской воды, приготовленной из морской соли (ООО «Царская соль», Крымская царская морская соль, помол № 1), и технической соды (ОАО «СОДА», Сода кальцинированная техническая), позволит обеспечить выделение в осадок молочного и соевого белка, проведена серия лабораторных испытаний. Экспериментальные данные сравнивались с классическим реагентным (оксихлорид алюминия, щелочь и Праестол 852 ВС) способом обработки вод.

Разработан план исследований, состоящий из нескольких этапов.

На *первом этапе* исследований проведено определение критической температуры сточных вод, образующихся при санитарной обработке лабораторного оборудования производства витаминизированного молочно-соевого концентрата. Установлено, что формирование казеинового сгустка в смеси молочных и соевых белков происходит при температуре выше 46 °С.

<sup>6</sup> Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа воды : сб. / под общ. ред. д-ра хим. наук, проф. Ю.Ю. Лурье. 2-е изд., испр. Москва : Химия, 1973. 376 с. С. 47, 255–257.

*Второй этап* исследований включал подготовку проб сточных вод с температурой 44 °С, распределение образцов в лабораторные цилиндры объемом 850 мл, добавление морской воды в различных пропорциях (50, 100, 150 мл), доведение общего объема до 1000 мл дистиллированной водой, внесение 10 % раствора технической соды до образования хлопьевидных агрегатов. В качестве эталонного образца использовалась классическая схема введения реагентов, оптимизация дозировок проводилась согласно стандартной методике с построением «кривой Смолуховского».

*Третий этап* исследований был направлен на проведение серии контрольных опытов, определение технологических параметров процесса, установку оптимального содержания морской воды (7,5 %), определение эффективного температурного диапазона коагуляции (42–44 °С).

По фазовому состоянию исходные сточные воды включают взвесь мелко-дисперсных порошковых концентратов сои и обезжиренного молока. В процессе мойки теплой водой технологического оборудования белковые компоненты частично слипаются и образуют агломерации фракцией 2–0,1 мм, при этом разработанный авторами режим коагуляции обеспечил формирование основной массы хлопьев размером 2–4 мм, при средней скорости осаждения 1 мм/с.

На рис. 1 представлен процесс коагуляции (*слева направо*):

- исходные сточные воды;
- созревание флоккул во всем объеме цилиндра;
- через 2 мин после ввода реагентов — разрыв пространственной сетки с формированием четкой границы раздела фаз и отдельно плавающими хлопьями в осветленной жидкости;
- через 10 мин после начала осаждения;
- через 25 мин после начала осаждения.



**Рис. 1.** Процесс коагуляции в лабораторных при оптимальных параметрах (морская вода 7,5 % + 130 мг/л 10 % раствора карбоната натрия, температура 42 °С)

*Источник:* фото С.Б. Кунденюк.

**Figure 1.** Coagulation process in the laboratory at optimal parameters (7.5 % sea water + 130 mg/l of 10 % sodium carbonate solution, temperature 42°C)

*Source:* photo by S.B. Kundenok.

Результаты эффективности очистки второго и третьего этапов исследования представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Показатели загрязняющих веществ в стоках до и после осаждения белков

Способ обработки сточных вод		Показатели загрязнений			
		Взвешенные вещества, мг/л		БПК <sub>5</sub> , мг/л	
Эксперимент	Контроль	Эксперимент	Контроль	Эксперимент	Контроль
Образец 1 5 % морской воды***; + 10 % раствор карбоната натрия, доза 120 мг/л	5 % — дистиллята; + 10 % раствор полиоксихлорид алюминия, доза 110 мг/л; + 1 % раствор Праестол 852 BC доза 1,5 мг/л; + 10 % раствор карбоната натрия, доза 11 мг/л	$1029 \pm 3,5^*$ $15,9 \pm 0,2^{**}$	$1032 \pm 3,1$ $15,8 \pm 0,2$	$887 \pm 3,3$ $291 \pm 2,6$	$887 \pm 3,3$ $220 \pm 2,9$
Образец 2 10 % морской воды; + 10 % раствор карбоната натрия, доза 138 мг/л	10 % — дистиллята; + 10 % раствор полиоксихлорида алюминия, доза 101 мг/л; + 1 % раствор праестол 852BC, дозой 1,5 мг/л; + 10 % раствор карбоната натрия, доза 107 мг/л	$976 \pm 3,4$ $15,8 \pm 0,1$	$975 \pm 3,4$ $15,7 \pm 0,1$	$838 \pm 3,3$ $72,5 \pm 2,7$	$838 \pm 3,1$ $211 \pm 2,7$
Образец 3 15 % морской воды; + 10 % раствор карбоната натрия, доза 147 мг/л	15 % — дистиллят; + полиоксихлорида алюминия, доза 97 мг/л, + 1 % раствор Праестол 852BC, дозой 1,5 мг/л; + 10 % раствор карбоната натрия, доза 101 мг/л	$921 \pm 3,2$ $15,7 \pm 0,1$	$919 \pm 3,1$ $15,7 \pm 0,2$	$792 \pm 3,0$ $68,7 \pm 2,5$	$792 \pm 3,3$ $191 \pm 2,7$

\* — в числителе дроби — исходные концентрации загрязнений сточных вод;

\*\* — в знаменателе дроби — концентрации загрязнений сточных вод после реагентной обработки;

\*\*\* — приготовлено из морской соли (концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  — 0,41 мг/л, а  $\text{Cl}^-$  — 18,7 мг/л).

Источник: составлено С.Б. Кунденко, В.Н. Волковой, Д.Л. Марковым, А.С. Финкельштейн, И.М. Казанцевым.

Table 2. Indicators of pollutants in wastewater before and after precipitation of proteins

Wastewater treatment method		Pollution indicators			
		Suspended solids, mg/l		BOD <sub>5</sub> , mg/l	
Experiment	Control	Experiment	Control	Experiment	Control
Sample 1 5% sea water***; + 10% sodium carbonatesolution, dose 138 mg/l	5% distillate; + 10% aluminum polyoxychloride solution, dose 110 mg/l; + 1% flocculant Praestol 852BC dose 1.5 mg/l; + 10% sodium carbonate solution, dose 111 mg/l	$1029 \pm 3.5^*$ $15.9 \pm 0.2^{**}$	$1032 \pm 3.1$ $15.8 \pm 0.2$	$887 \pm 3.3$ $291 \pm 2.6$	$887 \pm 3.3$ $220 \pm 2.9$

Table 2. Ending

Wastewater treatment method		Pollution indicators			
		Suspended solids, mg/l		BOD <sub>5</sub> , mg/l	
Experiment	Control	Experiment	Control	Experiment	Control
Sample 2 10% sea water; + 10% sodium carbonate solution, dose 120 mg/l	10% distillate; + 10% aluminum polyoxochloride solution, dose 101 mg/l; + 1% flocculant Praestol 852BC dose 1.5 mg/l; + 10% sodium carbonate solution, dose 107mg/l	976 ± 3.4	975 ± 3.4	838 ± 3.3	838 ± 3.1
		15.8 ± 0.1	15.7 ± 0.1	72.5 ± 2.7	211 ± 2.7
Sample 3 15% sea water; + 10% sodium carbonate solution, dose 147 mg/l	15% — distillate; + 10% aluminum polyoxochloride solution, dose 97 mg/l; + 1% flocculant Praestol 852BC dose 1.5 mg/l; + 10% sodium carbonate solution, dose 127 mg/l	921 ± 3.2	919 ± 3.1	792 ± 3.0	792 ± 3.3
		15.7 ± 0.1	15.7 ± 0.2	68.7 ± 2.5	191 ± 2.7

\* — in the numerator of the fraction — the initial concentrations of wastewater pollution;

\*\* — in the denominator of the fraction is the concentration of wastewater pollution after reagent treatment;

\*\*\*— made from sea salt (concentration of Ca<sup>2+</sup> ions — 0.41 mg/l, and Cl<sup>-</sup> — 18.7 mg/l).

Source: compiled by S.B. Kundenok, V.N. Volkova, D.L. Markov, A.S. Finkelshtein, I.M. Kazantcev.

Таблица 3. Показатели эффективности очистки загрязнений сточных вод при оптимальных показателях

№	Показатели	Исходные показатели загрязнений	Показатели загрязнений после очистки	Эффект очистки, %
1	Температура, °C	42–44	40–42	–
2	pH	7,5–7,8	7,9–8,5 (хлопьеобразования)	–
3	Взвешенные вещества, мг/л	1012 ± 0,3	15,8 ± 0,1	98,4 %
4	БПК <sub>5</sub> мг/л	862 ± 3,3	87 ± 3,1	89,9 %

Источник: составлено С.Б. Кунденюк, В.Н. Волковой, Д.Л. Марковым, А.С. Финкельштейн, И.М. Казанцевым.

Table 3. Indicators of the effectiveness of wastewater pollution treatment at optimal rates

№	Indicators	Baseline pollution indicators	Indicatorsof contamination after cleaning	The cleaning effect, %
1	Temperature, °C	42–44	40–42	–
2	pH	7.5–7.8	7.9–8.5 (flocculation)	–
3	Suspended solids, mg/l	1012 ± 0.3	15.8 ± 0.1	98.4 %
4	BOD <sub>5</sub> , mg/l	862 ± 3.3	87 ± 3.1	89.9 %

Source: compiled by S.B. Kundenok, V.N. Volkova, D.L. Markov, A.S. Finkelshtein, I.M. Kazantcev.

Разработаны параметры коагуляции, при которой протекает классический процесс хлопьеобразования, в качестве катионов использовались ионы кальция морской воды и технической соды, анионов — хлориды и сульфаты морской воды.

В табл. 4 приведены результаты гранулометрического анализа взвешенных частиц в сточных водах пищевого производства до и после реагентной обработки на анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec plus (Fritsch, Германия) (исходные сточные воды и вода после осаждения). В исходных стоках преобладают мелкодисперсные частицы — доля фракций менее 10 мкм (PM10) превышает 50 %, что обуславливает их высокую стабильность в водной среде и затрудняет естественное осаждение. После коагуляции наблюдается значительное увеличение размеров агрегатов: доля фракций более 600 мкм достигает от 50 до 90 %, а медианный диаметр возрастает до 696,2–1208,2 мкм. Полученные данные свидетельствуют об эффективном хлопьеобразовании, способствующем последующему отделению загрязнителей и снижению экологической опасности сточных вод. Это подтверждает целесообразность применения реагентной коагуляции в составе технологии очистки белоксодержащих производственных стоков.

По итогам исследований авторами статьи разработаны мероприятия, конструкторско-технологические решения (рис. 2) и рекомендации к проектированию локальных очистных сооружений сточных вод, обеспечивающие эффективную работу оборудования:

- совместно с пищевыми технологами разработан режим мойки пищевого оборудования;

- барабанную решетку исключили из схемы очистки, так как производственные сточные воды не содержат крупных включений, а сетка барабана будет забиваться белками;

- запроектирована индивидуальная конструкция накопителя. Корпус емкости тепло- и теплоизолировали, водную поверхность перекрыли сэндвич-панелями, оборудовали системой принудительной вентиляции для удаления избыточной влажности и специфических запахов. Дополнительно к механическим мешалкам предусмотрена подача воздуха, который замедляет процессы анаэробного брожения. Для удаления осадка и полного опорожнения накопителя предусмотрен перфорированный трубопровод, расположенный вдоль днища;

- разработана схема автоматизации работы двух напорных флотаторов, а вместо параллельного — предусмотрено последовательное включение подающих стоки насосов от датчиков уровня, которые размещаются на разных уровнях в усреднителе сточных вод, а их высотное положение можно корректировать в ходе пуско-наладочных работ. Дополнительно предусмотрен контроль по датчику температуры.

Технический результат, проявляющийся при решении поставленной задачи, выражается в следующем:

- повышении эффективности осветления коагулированных сточных вод за счет разработки инновационного способа физико-химической очистки и индивидуальных конструктивных решений накопителя с учетом температурного фактора;

- разработке элементов автоматизации технологического процесса, позволяющих в процессе эксплуатации регулировать объем подачи стоков на очистку.

Таблица 4. Гранулометрический состав взвешенных частиц до и после реагентной обработки

Преобладающая доля микрочастиц (Q3(x)), %	Фракция (x), μm	Сумма фракций, %	Гранулометрический состав взвешенных частиц				
			1*	2	3	4	5
	до/после	до/после	до/после				
10	1,4/2,3	22,5/16,0	1,4/2,3	1,0/1,8	0,9/1,5	0,8/1,6	0,8/2,0
20	2,5/5,3	23,4/23,2	2,5/5,3	1,8/4,5	1,6/3,7	1,5/4,9	1,4/7,2
30	3,8/9,0	24,9/21,0	3,8/9,0	2,6/7,8	2,3/7,0	2,2/9,4	2,0/12,6
40	5,5/13,5	26,8/182,5	5,5/13,5	3,6/13,5	3,1/11,2	3,0/18,5	2,8/751,8
50	7,8/696,2	28,6/7,1	7,8/696,2	5,0/803,9	4,3/751,6	4,1/817,9	3,8/855,1
60	10,9/858,7	29,3/3,1	10,9/858,7	6,8/902,9	6,0/870,0	5,7/909,8	5,3/935,6
70	14,9/959,9	27,7/2,0	14,9/959,9	9,4/989,3	8,6/964,6	8,0/993,6	7,5/1013,3
80	20,0/1064,9	23,5/1,4	20,0/1064,9	13,5/1087,0	12,6/1066,1	12,1/1089,9	10,8/1104,6
90	27,6/1208,2	12,7/1,1	27,6/1208,2	21,9/1223,5	20,6/1206,5	21,1/1225,3	19,6/1241,8

\* здесь и далее цифрами от 1 до 5 отображаются повторности отбора проб.

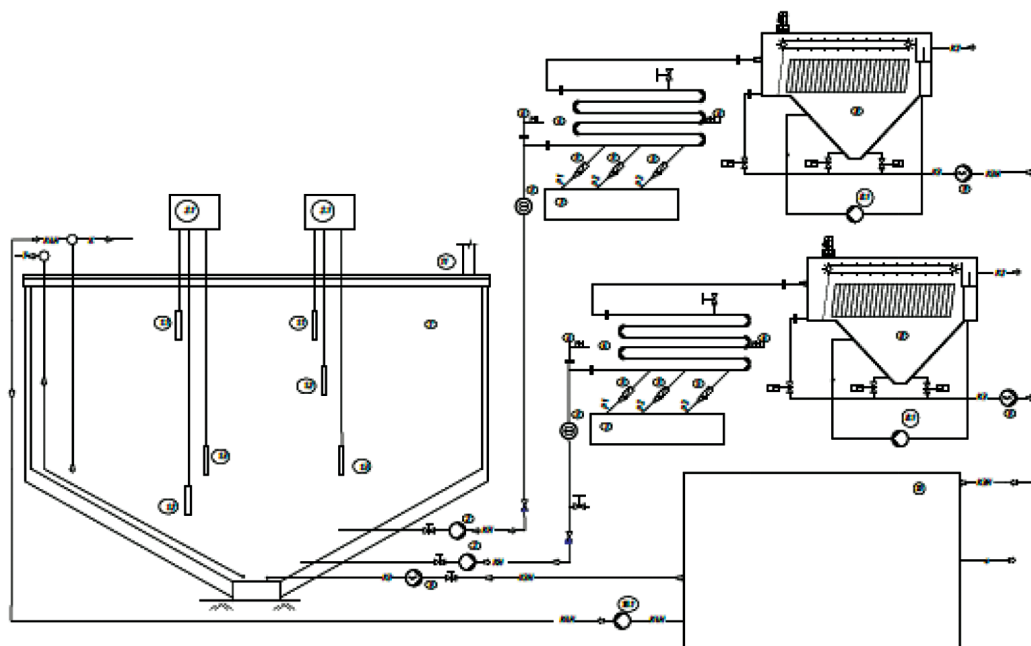
Источник: составлено С.Б. Кунденко, В.Н. Волковой, Д.Л. Марковым, А.С. Финкельштейн, И.М. Казанцевым.

Table 4. Granulometric composition of suspended particles before and after reagent treatment

The predominant proportion of microparticles (Q3(x)), %	Fraction (x), μm	The sum of fractions, %	Granulometric composition of suspended particles				
			1*	2	3	4	5
	before/after	before/after	before/after				
10	1.4/2.3	22.5/16.0	1.4/2.3	1.0/1.8	0.9/1.5	0.8/1.6	0.8/2.0
20	2.5/5.3	23.4/23.2	2.5/5.3	1.8/4.5	1.6/3.7	1.5/4.9	1.4/7.2
30	3.8/9.0	24.9/21.0	3.8/9.0	2.6/7.8	2.3/7.0	2.2/9.4	2.0/12.6
40	5.5/13.5	26.8/182.5	5.5/13.5	3.6/13.5	3.1/11.2	3.0/18.5	2.8/751.8
50	7.8/696.2	28.6/7.1	7.8/696.2	5.0/803.9	4.3/751.6	4.1/817.9	3.8/855.1
60	10.9/858.7	29.3/3.1	10.9/858.7	6.8/902.9	6.0/870.0	5.7/909.8	5.3/935.6
70	14.9/959.9	27.7/2.0	14.9/959.9	9.4/989.3	8.6/964.6	8.0/993.6	7.5/1013.3
80	20.0/1064.9	23.5/1.4	20.0/1064.9	13.5/1087.0	12.6/1066.1	12.1/1089.9	10.8/1104.6
90	27.6/1208.2	12.7/1.1	27.6/1208.2	21.9/1223.5	20.6/1206.5	21.1/1225.3	19.6/1241.8

\* Here and further, the numbers from 1 to 5 indicate the number of repetitions of the study.

Source: compiled by S.B. Kundenok, V.N. Volkova, D.L. Markov, A.S. Finkelshtein, I.M. Kazantsev.



**Рис. 2.** Схема реконструкции локальных очистных сооружений:

- 1 — накопитель сточных вод; 1.1 — датчик верхнего уровня воды; 1.2 — датчик нижнего уровня воды; 1.3 — датчик температуры; 2 — канализационный насос; 2.1 — шкаф управления работой насоса; 3 — электрифицированный расходомер; 4 — коагулятор; 5 — насос-дозатор; 6 — датчик pH; 7 — узел приготовления реагентов; 8 — реагентный флотатор; 8.1 — рециркуляционный насос; 9 — шнековый насос осадка; 10 — узел обработки флотопены и осадка; 10.1 — насос возврата фугата в накопитель; 11 — патрубок подключения накопителя к системе вентиляции; P1; P2; P3 — трубопроводы подачи реагентов; К — трубопровод производственных сточных вод; КН — напорный трубопровод сточных вод; К2 — трубопровод очищенных сточных вод; К3 — всасывающий трубопровод осадка; К3Н — напорный трубопровод осадка; К4Н — напорный трубопровод возврата фугата в накопитель; О — осадок на вывоз; Т — воздуховод

*Источник:* составлено С.Б. Кунденюк; В.Н. Волкова.

**Figure 2.** Reconstruction scheme of local sewage treatment plants

- 1 — waste water storage; 1.1 — upper water level sensor; 1.2 — lower water level sensor; 1.3 — temperature sensor; 2 — sewage pump; 2.1 — pump control cabinet; 3 — electrified flowmeter; 4 — coagulator; 5 — metering pump; 6 — pH sensor; 7 — reagent preparation unit; 8 — reagent flotation device; 8.1 — recirculation pump; 9 — screw sludge pump; 10 — flotation foam and sludge treatment unit; 10.1 — fugate return pump to the storage unit; 11 — pipe connecting the storage unit to the ventilation system; P1; P2; P3 — reagent supply pipelines; К — industrial wastewater pipeline; КН — pressure sewage pipeline; К2 — treated wastewater pipeline; К3 — sludge suction pipeline; К3Н — sludge pressure pipeline; К4Н — pressure return pipeline to the storage tank; О — sludge for export; Т — air duct

*Source:* compiled by the S.B Kundenok., V.N. Volkova.

В результате разработанного метода очистки выделенные белки в осадок и флотопену не содержат солей алюминия или железа и могут быть использованы в приготовлении грунта для озеленения после обеззараживания, например препаратом «Полиаминол» [13].

## Заключение

В научно-исследовательской работе рассматривается анализ воздействующих факторов и поиск новых экологических решений реагентной технологии обработки сточных вод производства пищевого продукта, в состав которого входят растительный и животный белок. Экспериментально определены эффективные режимы процесса физико-химической очистки разработанного авторами способа коагуляции. В качестве реагентов рекомендуется использовать сухие морские соли, поставляемые для бассейнов и карбонат натрия при температуре стока 42–44 °С.

Рассмотренные элементы задачи говорят о том, что выявление эффективных и при этом экономичных условий реагентной обработки требует индивидуального подхода к каждому виду сточных вод.

Проведенные исследования позволили определить критические температурные параметры процесса, установить оптимальное соотношение реагентов, выявить эффективные технологические режимы коагуляции, сформировать базу данных для дальнейшей оптимизации процесса очистки.

Полученные экспериментальные результаты создали основу для разработки эффективной технологии очистки сточных вод производства витаминизированных молочно-соевых концентратов.

## Список литературы

- [1] Волкова В.Н., Дудник Н.А., Казанцев И.М. Влияние технологических процессов очистных сооружений на видовой состав активного ила // Актуальные вопросы развития современной науки : монография. Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. С. 53–84. <http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/105-114> EDN: LOARKM
- [2] Байбородин А. М. Локальная очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий методом коагуляции : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.21.03. Архангельск, 2014. 134 с.
- [3] Назаренко В.А., Антонович В.П., Невская Е.М. Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах. Москва : Атомиздат, 1979. 192 с.
- [4] Zhang Z., Wang J., Liu D., Li J., Wang X., Song B., Yue B., Zhao K., Song Y. Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance // Journal of Environmental Sciences (China). 2017. Vol. 57. P. 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.10.014>
- [5] Roussy J., Van Vooren M., Dempsey B.A., Guibal E. Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions // Water Research. 2005. Vol. 39. Iss. 14. P. 3247–3258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.039>
- [6] Надысев В.С. Очистка сточных вод предприятий масло-жировой промышленности. Москва : Пищевая промышленность, 1976. 183 с.
- [7] Ebeling J.M., Sibrell P.L., Ogden S.R., Summerfelt S.T. Evaluation of chemical coagulation–flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge // Aquacultural Engineering. 2003. Vol. 29, Iss. 1–2. P. 23–42. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00029-3)

- [8] Narkis N., Rebhum M. Flocculation in present of organic macromolecules of natural water and secondary effluents // *Water Science and Technology*. 1997. Vol. 36. Iss. 4. P. 85–91. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00423-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00423-X)
- [9] Проскура В.Е., Кашина Е.С., Галяметдинов Ю.Г. Флокуляция модельных дисперсных систем природными полисахаридами, ионогенными сополимерами акриламида и гибридами на их основе // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 20. С. 22–25. EDN: ZXFJEN
- [10] Кунденок С.Б., Волкова В.Н. Технология очистки ливневых вод причальных сооружений перевалки древесины // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2024. Т. 32. № 4. С. 422–430. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-422-430> EDN: NINDLF
- [11] Волкова В.Н., Кунденок С.Б., Волков Д.В. Методы соосаждения тяжелых металлов в сточных водах гальванического производства ионами магния и кальция морской воды // *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2020. № 4 (45). С. 85–95. <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-9> EDN: EMBRXM
- [12] Кириченко К.Ю., Волкова В.Н., Чайка В.В., Голохваст К.С. Гранулометрический состав микроразмерных частиц комплексного состава, образующихся при техногенном воздействии на морскую среду // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2023. № 3. С. 49–55. EDN: KVVIMB
- [13] Волкова В.Н., Дудник Н.А., Казанцев И.М., Кунденок С.Б. Исследование влияния препарата «Полиаминол» на видовой состав активного ила // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2024. № 4 (61). С. 105–114. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/105-114> EDN: ETRSNZ

## References

- [1] Volkova VN, Dudnik NA, Kazantsev IM. The influence of technological processes of sewage treatment plants on the species composition of activated sludge. *Current Issues in the Development of Modern Science: Monograph*. Penza: Nauka i Prosveshchenie (Gulyaev G. Yu. Publ.); 2025. p. 53–84. (In Russ.). <http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/105-114>
- [2] Baiborodin AM. Local wastewater treatment at pulp and paper enterprises by coagulation method (abstract of the dissertation). Arkhangelsk; 2014. 134 p. (In Russ.)
- [3] Nazarenko V.A., Antonovich V.P., Nevskaya E.M. Hydrolysis of metal ions in dilute solutions. Moscow: Atomizdat Publ.; 1979. 192 p. (In Russ.)
- [4] Zhang Z, Wang J, Liu D, Li J, Wang X, Song B, Yue B, Zhao K., Song Y. Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2017;57:162–169. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.10.014>
- [5] Roussy J, Van Vooren M, Dempsey BA, Guibal E. Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions. *Water Research*. 2005;39(14):3247–3258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.039>
- [6] Nadyshev VS. *Wastewater treatment of fat and oil industry enterprises*. Moscow: Pishchevaya Promyshlennost Publ.; 1976. 183 p. (In Russ.)
- [7] Ebeling JM, Sibrell PL, Ogden SR, Summerfelt ST. Evaluation of chemical coagulation–flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. *Aquacultural Engineering*. 2003;29(1–2):23–42. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00029-3)

- [8] Narkis N, Rebhun M. Flocculation in presence of organic macromolecules of natural water and secondary effluents. *Water Science and Technology*. 1997;36(4):85–91. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00423-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00423-X)
- [9] Proskurina VE, Kashina ES, Galyametdinov YuG. Flocculation of model dispersed systems using natural polysaccharides, ionogenic copolymers of acrylamide and their hybrids. *Herald of Technological University*. 2017;20(20):22–25. (In Russ.) EDN: ZXFJEN
- [10] Kundenok SB, Volkova VN. Intensification of storm water treatment of wood transferring wood termination facilities. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):422–430. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-422-430> EDN: NINDLF
- [11] Volkova VN, Kundenok SB, Volkov DV. Methods for coprecipitation of heavy metals in waste waters of galvanic production with magnesium and calcium ions of seawater. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2020;(4):85–95. (In Russ.) <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-9> EDN: EMBRXM
- [12] Kirichenko KYu, Volkova VN, Chaika VV, & Golokhvast KS. (2023). Granulometric composition of suspended particles formed during anthropogenic impact on the marine environment. *Life Safety / Security Technologies*, (3), 49–55. (In Russ.) EDN: K VWIMB
- [13] Volkova VN, Dudnik NA, Kazanetsev IM, Kundenok SB. Study of the effect of the preparation “Polyaminol” on the species composition of activated sludge. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2024;(4):105–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/105-114> EDN: ETRSNZ

#### Сведения об авторах:

Кунденок Светлана Борисовна, старший преподаватель, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, д. 10. ORCID: 0000-0002-2118-2718; eLIBRARY SPIN-код: 1519-4482. E-mail: 14sveta65@mail.ru

Волкова Владислава Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, д. 10. ORCID: 0000-0001-9078-9858; eLIBRARY SPIN-код: 1519-4482. E-mail: vladavibi@bk.ru

Марков Данил Леонидович, магистр, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, д. 10. ORCID: 0009-0007-5504-5440. E-mail: markov.dl@dvfu.ru

Финкельштейн Артём Сергеевич, магистр, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, д. 10. ORCID: 0009-0004-7694-3774. E-mail: finkelshtein.as@dvfu.ru

Казанцев Илья Максимович, магистр, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, д. 10. ORCID: 0009-0008-0558-0725; eLIBRARY SPIN-код: 5749-3381. E-mail: kazantcev.im@dvfu.ru

#### Bio notes:

Svetlana B. Kundenok, Senior Lecturer, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, PolyRusky Island, village Ajax 10, Vladivostok, 690922, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2118-2718; eLIBRARY SPIN-code: 1519-4482. E-mail: 14sveta65@mail.ru

*Vladislava N. Volkova*, Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Russky Island, village Ajax 10, Vladivostok, 690922, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9078-9858; eLIBRARY SPIN-code: 1519-4482. E-mail: vladavibi@bk.ru

*Danil L. Markov*, graduate student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Russky Island, village Ajax 10, Vladivostok, 690922, Russian Federation. ORCID: 0009-0007-5504-5440. E-mail: markov.dl@dvfu.ru

*Artem S. Finkelshtein*, graduate student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Russky Island, village Ajax 10, Vladivostok, 690922, Russian Federation. ORCID: 0009-0004-7694-3774. E-mail: finkelshtein.as@dvfu.ru

*Ilya M. Kazantsev*, graduate student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Russky Island, village Ajax 10, Vladivostok, 690922, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-0558-0725; eLIBRARY SPIN-code: 5749-3381. E-mail: kazantsev.im@dvfu.ru



DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-293-305

EDN: PAMUUU


УДК 504.4.054

Научная статья / Research article

## Загрязнение Угличского водохранилища микропластиком: его содержание и распределение в абиотических компонентах водной экосистемы

К.В. Майданов<sup>1</sup>  , А.Ф. Тарлева<sup>1</sup> , Ю.В. Герасимов<sup>1</sup> ,  
Р.Р. Сайфуллин<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина РАН, Борок, Российская Федерация

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация  
 maydanovk@mail.ru

**Аннотация.** Осуществлен анализ загрязнения поверхностного слоя вод и донных отложений (ДО) Угличского водохранилища микропластиком (МП). Впервые проведена оценка содержания пластиковых частиц в ДО данного водоема. Изучена динамика концентраций МП, а также детально охарактеризованы его морфометрические (размер, форма) и колориметрические (цвет) параметры. Результаты, полученные в 2024 г., продемонстрировали повсеместное присутствие МП частиц в исследуемой акватории. Средняя концентрация их в водной толще составила  $43,1 \pm 4,8$  ед./м<sup>3</sup>, в то время как в ДО этот показатель достиг  $38,2 \pm 3,8$  ед./кг. Морфологический анализ выявил преобладание волокон в абиотических компонентах экосистемы, в то время как фрагменты встречались реже, а пленки были обнаружены единичные. Цветовая гамма идентифицированного МП отличалась значительным разнообразием, охватывая 10 цветовых категорий. Наиболее часто отмечались частицы серого, синего и красного оттенков.

**Ключевые слова:** динамика концентраций, волокна, пленки, фрагменты, донные отложения, поверхностный слой воды

**Вклад авторов.** Майданов К.В. — концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследовательского процесса (эксперимент), статистический анализ полученных данных, подготовка и создание рукописи, визуализация данных. Тарлева А.Ф. — концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследовательского процесса (сбор материала), подготовка и создание рукописи. Герасимов Ю.В., Сайфуллин Р.Р. — редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках Государственного задания на 2024–2028 гг. № 124032100075-5, 124032500015-8.

© Майданов К.В., Тарлева А.Ф., Герасимов Ю.В., Сайфуллин Р.Р., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи использовался онлайн-сервис на базе искусственного интеллекта (ChatGPT) для редактирования переведенного на английский язык текста. Авторы заявляют, что полностью осознают и принимают на себя всю полноту ответственности за содержание данной рукописи. Использование инструментов искусственного интеллекта носило вспомогательный характер и не заменяло экспертного суждения, критического мышления и научной добросовестности авторов.

**История статьи:** поступила в редакцию 08.10.2025; доработана после рецензирования 23.10.2025; принята к публикации 10.02.2026.

**Для цитирования:** *Майданов К.В., Тарлева А.Ф., Герасимов Ю.В., Сайфуллин Р.Р.* Загрязнение Угличского водохранилища микропластиком: его содержание и распределение в абиотических компонентах водной экосистемы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 293–305. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-293-305> EDN: PAMUUU

## Microplastic pollution of the Uglich Reservoir: its content and distribution in abiotic components of the aquatic ecosystem

Kirill V. Maydanov<sup>1</sup>✉, Anastasia F. Tarleva<sup>1</sup> , Yuri V. Gerasimov<sup>1</sup> ,  
Rustem R. Saifullin<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation*

✉ [maydanovk@mail.ru](mailto:maydanovk@mail.ru)

**Abstract.** This study analyzes the pollution of the surface water layer and bottom sediments (BS) of the Uglich Reservoir by microplastics (MP). For the first time, an assessment of the content of plastic particles in the BS of this water body has been conducted. The dynamics of MP concentrations were studied, and their morphometric (size, shape) and colorimetric (color) parameters were characterized in detail. The results obtained in 2024 demonstrated the ubiquitous presence of MP particles in the studied aquatic area. The average concentration in the water column was  $43.1 \pm 4.8$  items/m<sup>3</sup>, while in the BS this figure reached  $38.2 \pm 3.8$  items/kg. Morphological analysis revealed a predominance of fibers in the abiotic components of the ecosystem, whereas fragments were encountered less frequently, and films were found rarely. The color spectrum of the identified MP displayed significant diversity, encompassing 10 color categories. Particles of grey, blue, and red hues were the most observed.

**Keywords:** dynamics of concentrations, fibers, films, fragments, bottom sediments, surface water layer

**Authors' contribution.** *K. V. Maydanov* — conceptualization, development of methodology and design, conducting a research and investigation process (experiment), statistics analysis of obtained data, preparation, creation and presentation of the published work, visualization and data presentation. *A. F. Tarleva* — conceptualization, development of methodology and design, conducting a research and investigation process (material collection), preparation and creation of the published work. *Y. V. Gerasimov, R. R. Saifullin* — editing of the published work. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Funding.** The research was conducted as part of the State Assignment for 2024–2028, No. 124032100075-5, 124032500015-8.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** Generative artificial intelligence technologies (ChatGPT) were used to edit the English translated text. The authors declare that they fully understand and accept full responsibility for the content of this manuscript. The use of artificial intelligence tools was of a supporting nature and did not replace the authors' expert judgment, critical thinking, or scientific integrity.

**Data availability.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Article history:** received 08.10.2025; revised 23.10.2025; accepted 10.02.2026.

**For citation:** Maydanov KV, Tarleva AF, Gerasimov YV, Saifullin RR. Microplastic pollution of the Uglich Reservoir: its content and distribution in abiotic components of the aquatic ecosystem. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):293–305. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-293-305> EDN: PAMUUU

## Введение

Угличское водохранилище, расположенное в центральной части России на реке Волга, является важным звеном в каскаде Волжских водохранилищ. Созданное в 1939 г., оно простирается на 302 км вдоль русла реки, охватывая территории Ярославской и Тверской областей [1]. Водоохранилище выполняет целый ряд важных функций, включая регулирование стока Волги, обеспечение судоходства, гидроэнергетику, а также рекреацию и рыболовство. Площадь водного зеркала составляет 249 км<sup>2</sup>, а полный объем — 1,25 км<sup>3</sup> [2].

Однако интенсивное использование водохранилища на протяжении десятилетий привело к ряду экологических проблем, требующих пристального внимания. Одной из наиболее актуальных проблем является загрязнение водной среды, обусловленное как точечными, так и диффузными источниками. Основными загрязнителями выступают промышленные предприятия, сельскохозяйственные угодья и коммунальные стоки, расположенные в бассейне водохранилища [3]. В результате происходит увеличение концентрации органических веществ, биогенных элементов (азот, фосфор), тяжелых металлов и синтетических веществ, что негативно сказывается на качестве воды и состоянии водных экосистем [4].

В последние годы все больше внимания уделяется проблеме загрязнения морских и пресных водоемов микропластиком (МП). Исследования показы-

вают, что МП, попадая в водную среду, может накапливаться в организмах гидробионтов, нарушая их физиологические процессы и представляя угрозу для всей пищевой цепи [5]. Сведения по изучению содержания и распространения МП в бассейне Угличского водохранилища в доступной литературе единичны, поэтому существует острая необходимость активизации проведения научно-исследовательских работ для оценки масштабов загрязнения водоема и разработки мер по его предотвращению.

*Цель исследования* — оценить пространственное распределение МП в поверхностных слоях воды и ДО Угличского водохранилища, а также провести его количественный и качественный анализ.

## Материалы и методы

**Станции отбора проб.** В сентябре 2024 г. в ходе экспедиционных исследований было получено 19 образцов из двух сред: 15 проб отобрано с поверхностного слоя воды, а 4 — представляли собой ДО. Отбор проб производился с борта научно-исследовательского судна «Академик Топчиев» на 5 станциях, распределение которых охватывает всю акваторию водохранилища. При определении координат станций учитывались такие существенные факторы, как близость к крупным населенным пунктам и расположение устьевых участков притоков рек (табл.).

**Характеристика точек отбора проб и районирование бассейна Угличского водохранилища**

Шифр точки	Координаты	Крупные притоки	Ближайший населенный пункт	Пробы воды	Пробы ДО
UgR-1	56°47.313' N 37°14.830' E	р. Дубна	г. Дубна (Московская область)	+	+
UgR-2	57°04.189' N 37°31.207' E	р. Медведица	между г. Кимры и г. Калязин (Тверская область)	+	+
UgR-3	57°16.111' N 37°43.375' E	р. Кашинка	г. Калязин	+	+
UgR-4	57°23.339' N 38°6.504' E	р. Турша, р. Пукша	между г. Калязин и г. Углич (Ярославская область)	+	–
UgR-5	57°28.364' N 38°17.049' E	р. Мимощня, Грехов ручей	г. Углич	+	+

*Источник:* составлено К.В. Майдановым, А.Ф. Тарлевой.

**Сбор материала.** Отбор проб выполняли методом трехкратной фильтрации воды объемом 100 л через планктонную сеть с размером фильтрующего отверстия 74 мкм на каждой станции. Пробы ДО массой около 1,5–2,0 кг отбирали с использованием металлического дночерпателя системы Петерсена с известной площадью захвата 1/40 м<sup>2</sup> (данный показатель использовался для возможности пересчета содержания МП на площадь дна). Полученные образцы незамедлительно переносили в стеклянные емкости с металлическими крышками и консервировали путем криогенного хранения до момента проведения лабораторных исследований [6].

**Пробоподготовка, экстракция и методы анализа частиц МП.** Процедура лабораторной подготовки проб воды и ДО с последующей сепарацией МП осуществлялась в соответствии с методологическими рекомендациями авторов, включающими четыре последовательных этапа: флотацию, фильтрацию, просеивание и очистку проб от органического материала [7; 8]. Для ДО перед проведением работ определялась сырая масса каждой пробы, после чего каждая проба была высушена при температуре 80–85 °С до достижения воздушно-сухого состояния и использована для последующего исследования на содержание МП. Идентификация микропластиковых частиц осуществлялась визуальным методом с применением световой микроскопии (стереоскопический микроскоп Биомед МС–2 ZOOM), посредством которой определялись количественные показатели и морфологические признаки, включающие тип полимера, цветовую и размерную характеристику. Для описания качественных признаков МП использовалась морфологическая классификация, представленная в монографии [6].

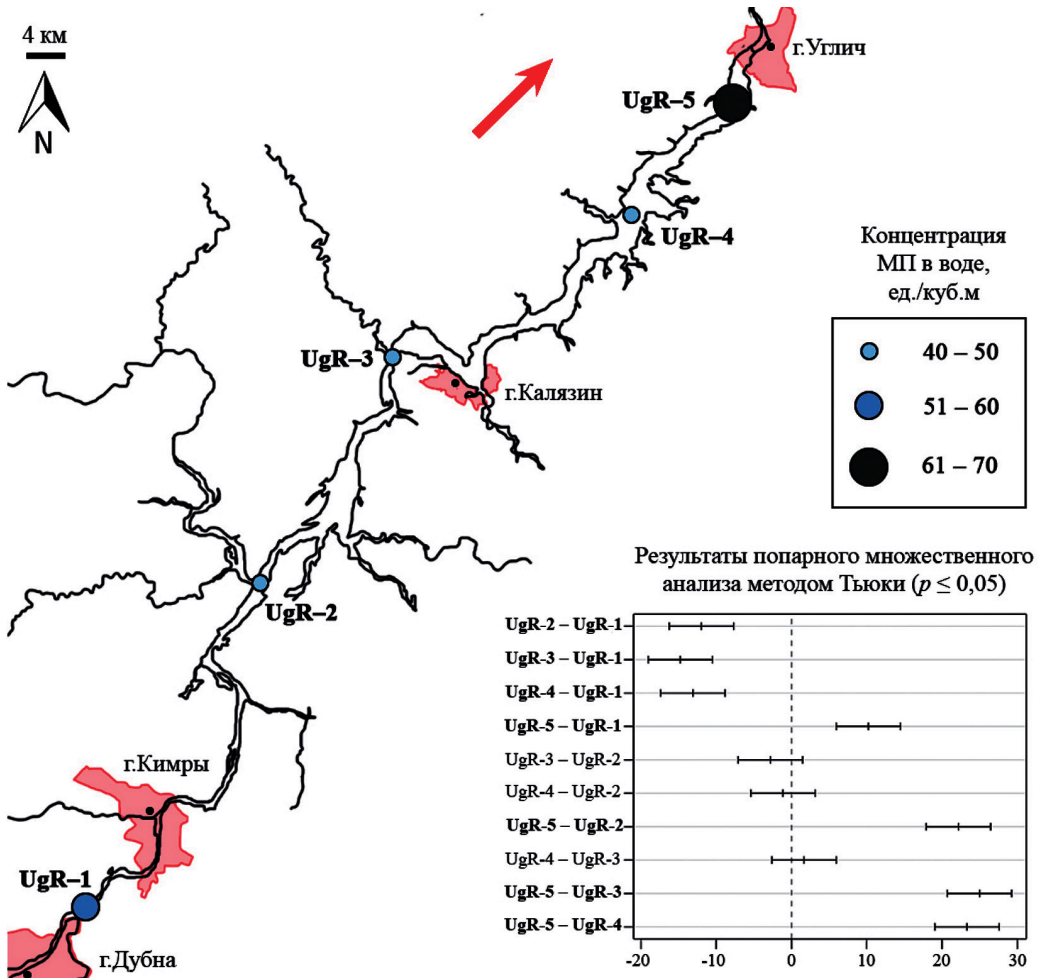
**Контроль качества.** Нивелирование погрешностей, обусловленных загрязнением реактивов в ходе пробоподготовки, обеспечивалось анализом контрольных растворов, приготовленных на основе дистиллированной воды, в соотношении 1:7 (одна контрольная проба на 7 проб воды). «Холостая» контрольная проба заменялась на дистиллированную воду, прошедшую тонкую фильтрацию, а все дальнейшие этапы пробоподготовки осуществлялись в полном соответствии с процедурами, применяемыми к экспериментальным образцам, и с использованием тех же реактивов. С целью минимизации риска дополнительного загрязнения образцов МП в ходе приготовления реактивов была проведена дополнительная фильтрация дистиллированной воды, выступающей в качестве растворителя, через металлическое сито с размером ячейки 25 мкм. Все реактивы также подвергались фильтрации непосредственно перед их соединением с образцом.

**Статистическая обработка.** В рамках исследования на основе полученных эмпирических данных были осуществлены вычисления среднего арифметического значения и стандартной ошибки для каждой анализируемой серии проб. Для оценки статистически значимых различий в общем количестве микрочастиц между результатами, полученными в различных сериях, применялся критерий Тьюки. Достоверность результатов математико-статистической обработки устанавливалась на уровне 95 % ( $p < 0,05$ ). Для выполнения статистического анализа было применено специализированное программное обеспечение R v. 4.5.0 [9].

## Результаты исследования

**Поверхностный слой воды.** В результате проведенного исследования во всех проанализированных пробах было установлено наличие микропластиковых частиц. Концентрация МП в водной среде варьировала в диапазоне от

$40,0 \pm 5,1$  ед./м<sup>3</sup> (точка UgR–3, расположенная ниже устья р.Кашинка) до  $65,6 \pm 8,1$  ед./м<sup>3</sup> (точка UgR–5, охватывающая устьевые участки впадающих рек) (рис. 1).



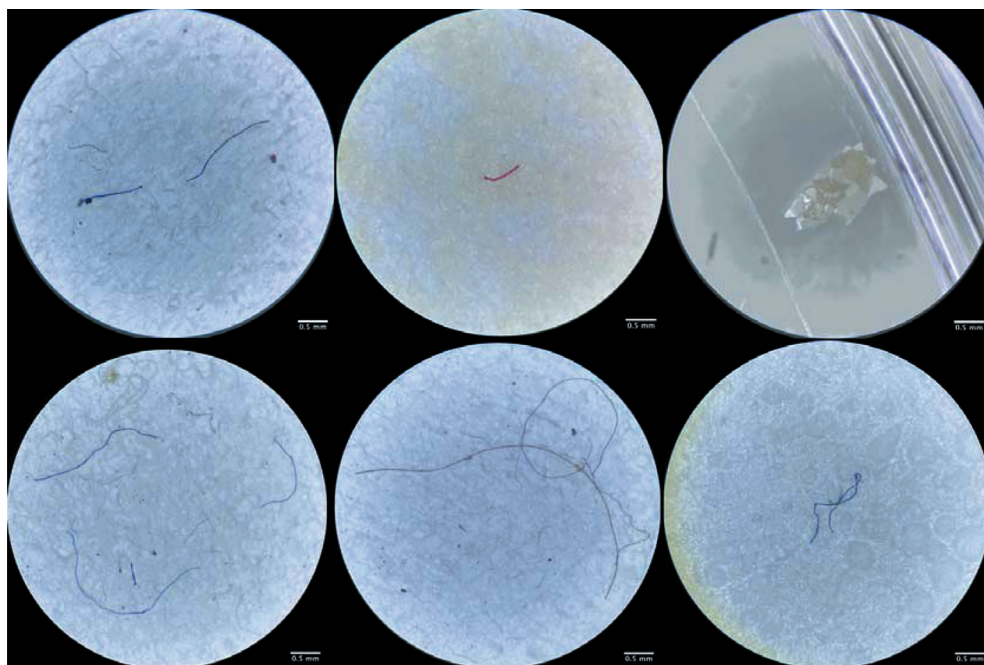
**Рис. 1.** Содержание частиц МП в воде Угличского водохранилища (ед./м<sup>3</sup>): кружками черного цвета указаны крупные населенные пункты (красной линией отмечены границы населенных пунктов), красная стрелка соответствует направлению течения р. Волга на данном зарегулированном участке. На графике представлены результаты попарного множественного анализа с применением критерия Тьюки при  $p \leq 0,05$ .

Источник: составлено К.В. Майдановым.

Минимальные значения содержания МП зафиксированы в среднем течении водохранилища, в частности в районе впадения р. Кашинка, а также на станциях UgR–2 в устье р. Медведица и UgR–4, расположенной ниже устьев рек Турша и Пукша, где плотность частиц составила  $43,3 \pm 3,9$  ед./м<sup>3</sup> и  $42,2 \pm 8,7$  ед./м<sup>3</sup> соответственно. Напротив, в верхнем участке водоема наблюдалась следующая картина: в точке UgR–1, расположенной на расстоянии 10 км ниже Ивановской ГЭС, скопление МП была значительно выше относительно выше-

упомянутых станций и достигало  $55,6 \pm 4,1$  ед./м<sup>3</sup> (\*). Наибольшая концентрация микропластиков в водоеме была зарегистрирована в приплотинном плесе водохранилища в точке UgR-5 (\*).

В ходе анализа проб, отобранных с поверхности воды, выявлено разнообразие морфологических форм МП (рис. 2). Доминирующим типом частиц, обнаруженных в пробах, являлись волокна, на долю которых приходилось 87,4 % от общего количества идентифицированных частиц. Фрагменты неправильной (угловатой) формы были зарегистрированы лишь на трех станциях (UgR-3, UgR-4, UgR-5) и составляли 10,81 % от общего числа обнаруженных частиц. Пленки, представляющие собой тонкие пластины, были обнаружены только в приплотинной части водохранилища и составляли незначительную долю — 1,8 %.

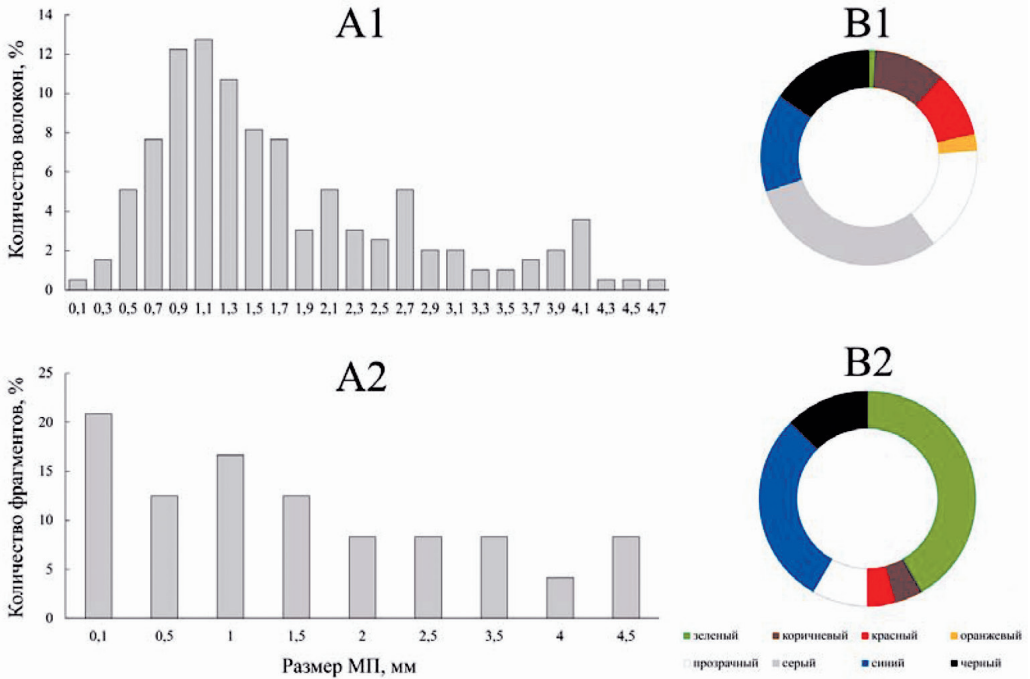


**Рис. 2.** Частицы МП, обнаруженные в пробах воды из Угличского водохранилища: масштабная линейка на фотографии соответствует значению 0,5 мм.

*Источник:* фото К.В. Майданова.

Кроме того, был произведен детальный анализ размерных показателей и цветовой гаммы МП. Диапазон размеров пластиковых частиц, зафиксированных во всех точках отбора проб, варьировал в пределах от 0,1 до 4,9 мм, при этом преобладающая часть имела длину менее 2 мм.

Анализ распределения цветов относительно морфологической структуры показал, что среди волокон наиболее часто встречались серые (30,1 %), прозрачные (15,8 %), черные (15,3 %) и синие (14,8 %) частицы. В то же время для фрагментов наиболее характерными являлись зеленый (41,7 %) и синий (29,2 %) цвета (рис. 3).



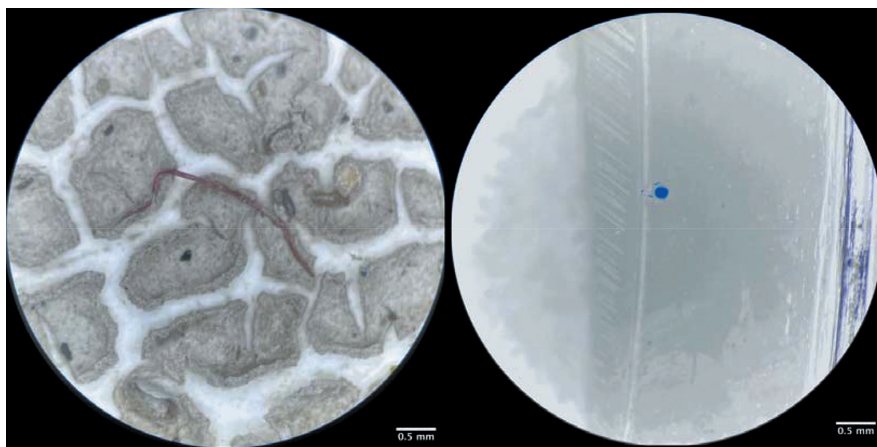
**Рис. 3.** Процентное содержание в размерном ряду и общее распределение цветов частиц МП из проб воды относительно их морфологической структуры по всем точкам отбора проб:

A1; B1 — волокна и A2; B2 — фрагменты

Источник: составлено К.В. Майдановым.

**Донные отложения.** В ходе исследования было установлено повсеместное присутствие частиц МП на всех станциях отбора проб. Максимальная их концентрация была зафиксирована в точке UgR-3 — место впадения р. Кашинка в р. Волга — и составила 47,6 ед./кг (400 ед./м<sup>2</sup> — эквивалентно в пересчете на площадь дна). Тип грунта в данной точке характеризовался как серый песчанистый ил. В пробах с песчаным типом грунта, отобранных на устьевом участке р. Медведица, содержание МП достигало 40 ед./кг (320 ед./м<sup>2</sup>), а в точке UgR-1, расположенной выше, концентрация составила 29,9 ед./кг (240 ед./м<sup>2</sup>). Анализ проб, полученных с приплотинной части водохранилища, где грунт представлен серым илом, выявил содержание МП на уровне 35,1 ед./кг, что соответствует 160 ед./м<sup>2</sup>. Таким образом, результаты указывают на наибольшую степень загрязнения ДО в центральной части Угличского водохранилища в зоне перехода грунтов от песчаного типа к серому песчанистому илу.

Анализ морфологической структуры обнаруженных частиц МП выявил доминирование волокон (59,1 %), в свою очередь, фрагменты и пленки составили 27,3 и 13,6 % соответственно. Примечательно, что в точке UgR-5 были обнаружены исключительно волокна, в то время как в других точках отбора проб наблюдалось разнообразие морфологических форм (рис. 4).

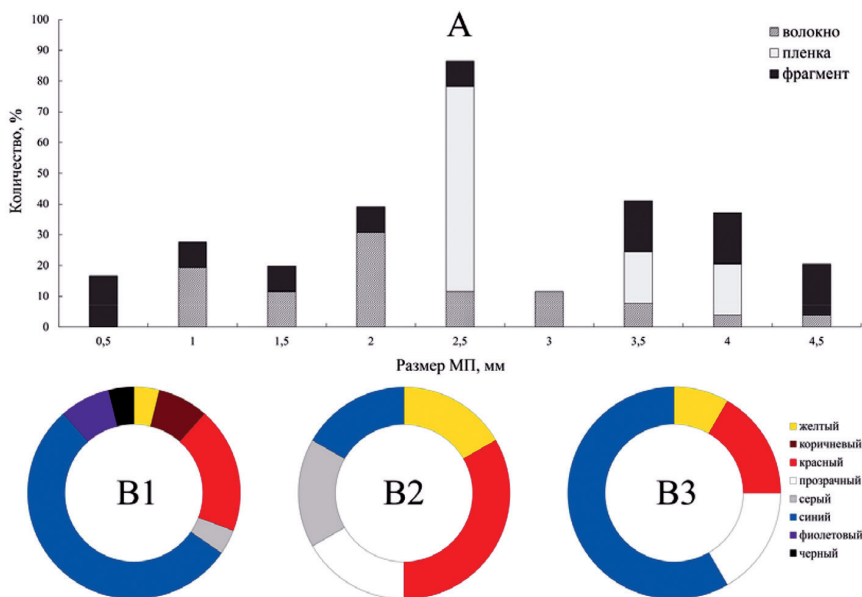


**Рис. 4.** Частицы МП, обнаруженные в пробах ДО из Угличского водохранилища: масштабная линейка на фотографиях соответствует значению 0,5 мм.

Источник: фото К.В. Майданова.

Оценка размерной характеристики обнаруженного МП показала, что длина частиц варьируются в пределах от 0,7 до 4,9 мм. Наибольшее количество волокон (65,4 %) имело размеры от 1,8 до 3,4 мм, тогда как среди пленок преобладали частицы размером 2,7–2,9 мм (66,7 %). Подавляющее большинство фрагментов (63,4 %) находилось в диапазоне размеров 3,7–4,9 мм.

Анализ цветовой гаммы выявил преобладание синего цвета среди волокон и фрагментов (53,8 и 58,3 % соответственно), в то время как среди пленок наиболее распространенным оказался красный цвет (33,4 %) (рис. 5).



**Рис. 5.** Процентное содержание в размерном ряду (А) и общее распределение цветов частиц МП из проб ДО относительно их морфологической структуры по всем точкам отбора проб:

В1 — волокна; В2 — пленки; В3 — фрагменты

Источник: составлено К.В. Майдановым.

## Обсуждение и результаты

Результаты настоящего исследования показали повсеместное присутствие МП в акватории Угличского водохранилища, зафиксированное как в поверхностном слое воды, так и в ДО. Анализ полученных данных позволил установить среднюю концентрацию МП в воде для Угличского водохранилища на уровне  $43,1 \pm 4,8$  ед./м<sup>3</sup>. Содержание МП в ДО, в свою очередь, оценено в  $38,2 \pm 3,8$  ед./кг. Причиной наблюдаемой вариативности концентраций МП на различных станциях отбора проб может быть случайное распределение частиц в водохранилище, обусловленное их физико-химическими характеристиками и зависящее от гидродинамических процессов, протекающих в водоеме, а также механическим составом грунта для ДО.

Сравнительный анализ полученных нами данных о концентрациях МП в абиотических компонентах Угличского водохранилища с ранее опубликованными сведениями указывает на соответствие низкому уровню загрязнения. Так, по результатам глобального исследования проб воды из 168 рек средние концентрации МП достигали 11128 ед./м<sup>3</sup>, а в ДО 96 рек — 1161 ед./кг [10; 11]. Исследования ученых К(П)ФУ, проведенных на Мешинском заливе Куйбышевского водохранилища в 2021 г., показали, что концентрации МП в воде находились на уровне  $20,5 \pm 22,3$  ед./м<sup>3</sup>, а в илисто-глинистых ДО —  $44,7 \pm 41,8$  ед./кг и соответствовали низкому уровню загрязнения [12]. В свою очередь, данные А.А. Ершовой (2023) свидетельствуют о высоком загрязнении рек бассейна р. Волги в районе г. Нижний Новгород: среднее содержание МП в воде составило 600 ед./м<sup>3</sup> [13]. По данным исследователей географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, в октябре 2020 г. анализ воды в окрестностях г. Дубна выявил незначительное содержание МП, не превышающее 0,5 ед./м<sup>3</sup>, при этом максимальное зафиксированное значение составило 0,75 ед./м<sup>3</sup>. Ниже по течению от г. Дубна наблюдалось увеличение концентрации микропластика в несколько раз, с колебаниями в диапазоне от 0,27 до 0,75 ед./м<sup>3</sup>. Самое низкое содержание МП зарегистрировано в районе г. Углич и составило 0,215 ед./м<sup>3</sup> [14]. Важно подчеркнуть, что расхождение между результатами, полученными в рамках данной работы, и данными, представленными в научном труде, обусловлено различиями в методологии отбора проб и применением отличающегося оборудования. В частности, в [14] использовалась сеть Манта с размером ячеек фильтрующей части 300 мкм, что могло повлиять на селективность отбора частиц МП.

На основании мировой практики исследования частиц МП в качестве наиболее распространенных морфологических типов являются волокна и фрагменты [15]. Результаты морфологического анализа выявили доминирование волоконных частиц МП во всех исследованных пробах, отобранных в 2024 г. в Угличском водохранилище. Обнаружение данного типа МП в высокой концентрации позволяет сделать предположение об источниках поступления

в водоем, связанных с использованием текстильных материалов и искусственных полимеров в их составе, различных рыболовных снастей. Более того, волоконная морфология материала, характеризующаяся удлиненной формой и большой площадью поверхности, благоприятствует адсорбции органических веществ. Этот процесс, в свою очередь, способствует увеличению плотности и последующему осаждению в ДО.

Размеры обнаруженных частиц МП варьировались в широком диапазоне, что, вероятно, обусловлено различными механизмами деструкции полимерных материалов, протекающими в водной среде. В ходе анализа распределения МП по размерам получены следующие средние значения:  $1,86 \pm 0,13$  мм в поверхностном слое воды и  $2,77 \pm 0,34$  мм в ДО. Сравнительный анализ с данными К(П)ФУ, где размеры МП в воде составили  $2,074 \pm 1,885$  мм, а в ДО —  $0,145 \pm 0,212$  мм, показал расхождение в размерных характеристиках МП в ДО, что может являться следствием различий в стратификации зон отбора проб: в настоящем исследовании пробы ДО отбирались преимущественно в русловой зоне, в то время как в цитируемой работе отбор проводился в прибрежной части акватории [12].

Цветовая палитра МП характеризовалась значительным разнообразием: выявленные частицы распределялись по 10 цветовым категориям, при этом наиболее часто встречались формы серого, синего и красного цветов. В пробах ДО Азовского моря доминировали прозрачные и черные частицы, составляющие 90 и 7,5 % соответственно, тогда как доля синих, белых, красных, желтых, розовых и фиолетовых частиц была незначительной — около 2 % [16]. Анализ проб ДО озера Байкал выявил присутствие МП 12 цветовых групп. Среди волокон преобладали черные (52,9 %), синие (28,7 %) и зеленые (10,8 %) частицы, тогда как фрагменты преимущественно были белыми (40,4 %), синими (25,3 %) и красными (15,2 %) [17]. Различия в цветовых характеристиках могут служить индикаторами источников поступления МП в водоем, а также отражать возможные механизмы его деградации.

## Заключение

В 2024 г. результаты проведенных исследований продемонстрировали повсеместное распространение МП в водной экосистеме Угличского водохранилища, подтверждая его роль в качестве поллютанта абиотических компонентов среды. Отчетливо зафиксировано присутствие полимерных частиц, варьирующихся по морфологическим характеристикам и размерности, как в поверхностных слоях водной толщи, так и в ДО, что свидетельствует о глобальном масштабе контаминации. Загрязнение МП водных экосистем представляет собой значительную проблему, требующую разработки стратегий по снижению негативного воздействия. Результаты данного исследования демонстрируют широкое распространение этого загрязнителя в ДО и водных

массах Угличского водохранилища, способствуя формированию базы данных для мониторинга и регулирования экологического состояния. Эти данные также углубляют понимание масштабов и характеристик загрязнения.

### Список литературы

- [1] Ресурсы поверхностных вод СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966–. Т. 10 : Верхне-Волжский район. Кн. 1. Т. 10 / сост. Ю. Е. Яблоков, инж. Т. Н. Чижмакова, П. Б. Шехтман [и др.] ; под ред. Ю. Е. Яблокова. 1973. 475 с.
- [2] Водные ресурсы России и их использование = Water resources of Russia and their use : монография / [И. А. Шикломанов и др.] ; под ред. И. А. Шикломанова. Санкт-Петербург : Гос. гидрологический ин-т, 2008. 596 с.
- [3] Крылова И.Н., Томилина И.И. Оценка токсических и мутагенных свойств природной воды и донных отложений водохранилищ Верхней Волги // Биология внутренних вод. 2000. №1. С. 110–117.
- [4] Экологические проблемы Верхней Волги : коллективная монография / Ярославский государственный технический университет / под ред. А. И. Копылова. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
- [5] Wright S.L., Kelly F.J. Plastic and human health: a micro issue // *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51. Iss. 12. P. 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- [6] Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде : монография. Москва : Научный мир, 2021. 520 с.
- [7] Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C., Herring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. Silver Spring : NOAA Marine Debris Division, 2015. 39 p.
- [8] Зобков М.Б., Евсюкова Е.Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 1. С. 149–157. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>
- [9] R Core Team. R. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. URL: <https://www.R-project.org/> (accessed: 25.09.2025).
- [10] Gallitelli L., Cesarini G., Cera A., Sighicelli M., Lecce F., Menegoni P., Scalici M. Transport and deposition of microplastics and mesoplastics along the river course: a case study of a small river in central Italy // *Hydrology*. 2020. Vol. 7. No. 4. 90. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040090> EDN: BOYUZK
- [11] Cera A., Cesarini G., Scalici M. Microplastics in freshwater: what is the news from the world? // *Diversity*. 2020. Vol. 12. No. 7. Article no. 276. <https://doi.org/10.3390/d12070276> EDN: JCWCCE
- [12] Степанова Н.Ю., Шевчук К.А., Кузьмин Л.С., Гайсин А.Р. Микропластик в абиотических и биотических компонентах Мешинского залива Куйбышевского водохранилища (Республика Татарстан) // *Биология внутренних вод*. 2024. Т. 17. № 4. С. 670–676. <https://doi.org/10.31857/S0320965224040157> EDN: YIPKQY
- [13] Ершова А.А., Макеева И.Н., Ясинский С.В. Микропластик в поверхностных и подземных водах крупного города в бассейне р. Волги (на примере Нижнего Новгорода) // *Вопросы географии*. 2023. № 157. С. 402–420. EDN: RADFHN

- [14] *Lisina A.A., Platonov M.M., Lomakov O.I., Sazonov A.A., Shishova T.V., Berkovich A.K., Frolova N.L.* Microplastic abundance in Volga River: results of a pilot study in Summer 2020 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. Vol. 14. No. 3. P. 82–93. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-041> EDN: QXEMBM
- [15] *Rebelein A., Int-Veen I., Kammann U., Scharsack J.P.* Microplastic fibers — Underestimated threat to aquatic organisms? // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 777. Article no. 146045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146045> EDN: hmmvam
- [16] *Глушко А.Е., Беспалова Л.А., Беспалова Е.В., Картамышева Т.Б.* Загрязнение микропластиком донных отложений Азовского моря // *Наука юга России*. 2021. Т. 17. № 2. С. 57–65. EDN: SWEYFE
- [17] *Solodkova A., Biritskaya S., Guligiev A., Rechile D., Ermolaeva Ya., Lavnikova A., Golubets D., Slepchenko A., Kodatenko I., Bashkircev A., Kulbachnaya N., Kondratieva D., Solomka A., Karnaukhov D., Silow E.* Microplastics in sediments of the littoral zone and beach of Lake Baikal // *Limnological Review*. 2025. Vol. 25. No. 4. Article no. 46. <https://doi.org/10.3390/limnolrev25040046> EDN: HNXWUQ

### Сведения об авторах:

*Майданов Кирилл Викторович*, младший научный сотрудник лаборатории экологии рыб, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Российская Федерация, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109. ORCID: 0000-0002-6991-1887; eLIBRARY SPIN-код: 1151-3691. E-mail: maydanovk@mail.ru

*Тарлева Анастасия Федоровна*, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии рыб, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Российская Федерация, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109. ORCID: 0000-0001-5638-6537; eLIBRARY SPIN-код: 3582-1692. E-mail: ns\_tarleva@ibiw.ru

*Герасимов Юрий Викторович*, доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Российская Федерация, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109. ORCID: 0000-0003-4515-9771; eLIBRARY SPIN-код: 5735-3506. E-mail: gu@ibiw.ru

*Саифуллин Рустем Рашитович*, кандидат биологических наук, доцент, Институт фундаментальной медицины и биологии, кафедра биоэкологии, гигиены и общественного здоровья, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Российская Федерация, 420059, Казань, Приволжский р-н, Оренбургский тракт, д. 10. ORCID: 0000-0002-0414-1906; eLIBRARY SPIN-код: 7833-7395. E-mail: saifullin1955@mail.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-306-320

EDN: PCWYYE

УДК 628.473.22

Научная статья / Research article

## Исследование физико-химических свойств и микробиоценоза целлюлозосодержащего волокна — побочного продукта производства кормов для животных

И.Р. Курзенёв , Т.А. Василенко *Белгородский государственный технический университет, Белгород, Российская  
Федерация*✉ [spandwaryandex@gmail.com](mailto:spandwaryandex@gmail.com)

**Аннотация.** Исследованы физико-химические, токсикологические свойства целлюлозосодержащего волокна, являющегося побочным продуктом производства кормов для животных, и установлен консорциум микроорганизмов, который развивается на исследуемом объекте. Химический состав целлюлозосодержащего волокна следующий: влажность — 47,00 %; зола — 1,16 %; органическое вещество — 51,84 % (в том числе крахмал — 25,10 %; жиры — 4,40 %). Содержание азота и фосфора в исследуемом образце составляет 2,43 и 1,90 %. Исследована зависимость изменения pH, влажности от времени естественной ферментации исследуемого образца. Был проведен анализ золы исследуемого побочного продукта, в котором преобладают оксиды: кремния  $\text{SiO}_2$  — до 51,30 %; фосфора  $\text{P}_2\text{O}_5$  — до 17,63 %; алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — до 10,25 %. Установлен микробиоценоз водной вытяжки из целлюлозосодержащего волокна при посеве на твердые агаризованные среды; преобладающими являются микроорганизмы, относящиеся к родам: *Penicillium*, *Cladosporium*, *Bacillus*, *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* и *Escherichia*. Кратность разведения водной вытяжки из исследуемого объекта, при которой вредное воздействие на гидробионты отсутствует, равна 100, что соответствует малоопасному отходу по степени негативного воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** ферментация, волокно зерна злаковых культур, микроорганизмы

**Вклад авторов.** Курзенёв И.Р. — анализ полученных данных, написание текста, дизайн исследования. Василенко Т.А. — концепция исследования, обработка материалов. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Курзенёв И.Р., Василенко Т.А., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Заявление о доступности данных.** Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

**История статьи:** поступила в редакцию 15.12.2025; доработана после рецензирования 29.12.2025; принята к публикации 11.02.2026.

**Для цитирования:** Курзенёв И.Р., Василенко Т.А. Исследование физико-химических свойств и микробиоценоза целлюлозосодержащего волокна — побочного продукта производства кормов для животных // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 306–320. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-306-320> EDN: PCWYYE

## Research of the physico-chemical properties and microbiocenosis of cellulose-containing fiber — a by-product of the production of animal feed

Ivan R. Kurzenev  , Tatyana A. Vasilenko 

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation*

 spandwaryandex@gmail.com

**Abstract.** The physicochemical and toxicological properties of cellulose-containing fiber, which is a by-product of animal feed production, have been investigated and a consortium of microorganisms has been established, which is developing at the facility under study. The chemical composition of cellulose-containing fiber is as follows: moisture — 47.00%; ash — 1.16%; organic matter — 51.84% (including: starch — 25.10%; fats — 4.40%). The nitrogen and phosphorus content in the test sample is 2.43 and 1.90%. The dependence of changes in pH and humidity on the time of natural fermentation of the sample studied is investigated. The ash of the studied by-product was analyzed, in which oxides predominate: silicon  $\text{SiO}_2$  — up to 51.30%; phosphorus  $\text{P}_2\text{O}_5$  — up to 17.63%; aluminum  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — up to 10.25%. Microbiocenosis of aqueous extracts from cellulose-containing fiber has been established when seeded on solid agarized media; microorganisms belonging to the genera *Penicillium*, *Cladosporium*, *Bacillus*, *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* and *Escherichia* are predominant. The multiplicity of dilution of aqueous extract from the studied object, in which there is no harmful effect on aquatic organisms, is equal to 100, which corresponds to low-hazard waste in terms of the degree of negative impact on the environment.

**Keywords:** fermentation, grain fiber of cereal crops, microorganisms

**Funding.** This work was realized in the framework of the Program “Priority 2030” on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

**Authors’ contribution.** I.R. Kurzenev — analysis of the obtained data, writing the text, and research design; T.A. Vasilenko — research concept, material processing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Data availability statement.** All data obtained during this study are included in the published article.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Article history:** received 15.12.2025; revised 29.12.2025; accepted 11.02.2026.

**For citation:** Kurzenev IR, Vasilenko TA. Research of the physico-chemical properties and microbiocenosis of cellulose-containing fiber — a by-product of the production of animal feed. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):306–320. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-306-320> EDN: PCWYYE

## Введение

Органические отходы жизнедеятельности в животноводстве сильно контаминированы по санитарно-бактериологическому состоянию. При правильном соблюдении условий компостирования патогенная микрофлора погибает [1]. Скорость разложения органических материалов, содержащих целлюлозу, зависит от активности членов микробного сообщества, которые требуют исследований [2]. Органические отходы садоводства и овощеводства (бахчевые и овощные культуры) являются ценным сырьем при получении масла с использованием масляных дрожжей *Cryptococcus curvatus* при начальном содержании углеводов в пределах 30–65 г/л [3]. Верно подобранный консорциум микроорганизмов для отхода органического происхождения — навоза крупного рогатого скота — способствует снижению численности патогенной микрофлоры и фиксирует атмосферный азот при компостировании [4]. Для отходов сельского хозяйства, являющихся вторичными материальными ресурсами, содержащими лигнин, целлюлозу, крахмал и пектин, применяются природные и специально выведенные штаммы микроорганизмов, которые осуществляют микробиологическую переработку растительной биомассы [5]. Катализатором расщепления целлюлозы в составе органических отходов являются ферменты целлюлаза и полисахаридмонооксигеназа [6]. С целью повышения выхода метана при анаэробном разложении органических отходов в биореакторе возможно создание постоянного электрического тока. Данный процесс носит название «электрометаногенез» [7]. Микроорганизмы способны восстанавливать высокотоксичные и растворимые в воде соли тяжелых металлов до менее токсичных и слабо растворимых солей в сточных водах и осадках. Для этих целей применяются сульфатредуцирующие бактерии [8].

В работе представлены результаты по использованию почвенных мицелиальных грибов родов *Trichoderma*, *Aspergillus* и *Penicillium*, их термостабильность и целлюлазная активность. Используемые приемы можно рекомендовать для экспресс-отбора перспективных штаммов. Отобраны четыре культуры моноспоровых изолятов мицелиальных грибов, полученных из природных

резерватов, перспективные для включения в комплекс деструкторов для осуществления компостирования целлюлозосодержащих отходов и растительных остатков [9].

В работе [10] при создании искусственного почвогрунта использовались следующие компоненты: отход мокрой сепарации (15–20 %), глина (30–40 %), цитрогипс (10–15 %), песок (15–20 %), а в качестве источника органического вещества были использованы доступные нетоксичные отходы (растительные остатки). Полученная почвосмесь снижает антропогенное воздействие на окружающую среду и имеет приближенные характеристики, как у темно-серой лесной почвы.

С использованием молекулярно-биологических методов установлено, что значительная часть бактерий, архей и микроскопических грибов в микробиоценозе компоста, представлена некультивируемыми видами (не выделены в чистые культуры). Начальную мезофильную стадию компостирования осуществляют мезофильные бактерии и грибы, которые в дальнейшем при повышении температуры замещаются термофилами [11]. Авторами исследованы оптимальные условия процесса совместного компостирования, осуществленного в II этапа, помета птицы и рисовой соломы. Рисовая солома вначале обрабатывалась грибами родов *Trametes*, *Phanerochaete* и *Lentinus* [12]. На примере сельскохозяйственных отходов, таких как кукурузный початок и жмых сахарного тростника, показана возможность получения бактериальной целлюлозы с использованием двух групп бактерий рода *Komagataeibacter* [13]. Выход бактериальной целлюлозы возрастает в два раза при культивировании бактерий рода *Komagataeibacter* совместно с бактериями, продуцирующими декстран (рода *Leuconostoc*) и ксантан (рода *Xanthomonas*). Питательной средой для культивирования служил побочный продукт — меласса [14].

**Цель исследования** — исследование процесса ферментации целлюлозосодержащего волокна.

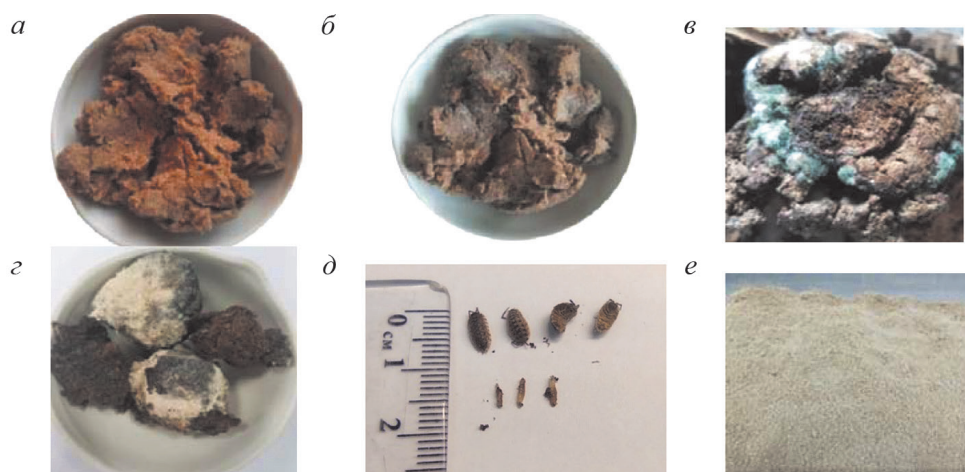
**Задачи:**

- 1) изучить физико-химические показатели целлюлозосодержащего волокна;
- 2) исследовать микробиоценоз путем посева водной вытяжки из образца на твердые агаризованные среды.

## Материалы и методы

Целлюлозосодержащее волокно представляет собой плотно спрессованные влажные волокна с хлебным запахом, образуется в производстве кормовых добавок микробиологическим способом для животных. Данное волокно формируется из зерна злаковых культур после измельчения и частичной ферментации. На поверхности волокна в процессе хранения уже с первых дней

контактирования с окружающей средой было обнаружено обрастание плесневыми мицелиальными грибами с характерным тухлым запахом. Рост мицелиальных грибов на поверхности волокна представлен на рис. 1, а–г. Наблюдались физическое разрушение и фрагментация растительного материала на более мелкие части, что обеспечивало большую площадь поверхности для колонизации микроорганизмами. В процессе разложения в окружающей среде в исследуемом целлюлозосодержащем волокне появились колонии мокриц рода *Oniscidea* (рис. 1, д), в среднем 60 особей на 1 кг образца. Обнаруженные членистоногие относятся к редуцентам. Для физико-химических и токсикологических исследований волокно было высушено при температуре 105 °С (рис. 1, е). Были изучены физико-химические свойства волокна (табл. 1).



**Рис. 1.** Рост мицелиальных грибов на поверхности волокна:

а — второй день; б — третий день; в — десятый день; г — восемьдесят пятый день; д — мокрицы рода *Oniscidea*; е — образец после измельчения (размер фракции менее 5 мм) и высушивания при температуре  $105 \pm 2$  °С

Источник: фото И.Р. Курзенёва.

**Figure 1.** Growth of mycelial fungi on the fiber surface:

а — second day; б — third day; в — the tenth day; г — the eighty-fifth day; д — genus of woodlice *Oniscidea*; е — sample after crushing (fraction size less than 5 mm) and drying at a temperature  $(105 \pm 2)$ °C

Source: photo by I.R. Kurzenev.

Целлюлозосодержащее волокно состоит из следующих компонентов: вода — 47,00 %; органическое вещество (сложные углеводы, жиры) — 51,84 %; зола — 1,16 % (минеральные компоненты). В исследуемом образце преобладает содержание макроэлементов: азота — 2,43 %, фосфора — 1,90 %; содержание сложных углеводов следующее: крахмал — 25,10 %, клетчатка — 3,76 %. В водной вытяжке (1:10) из целлюлозосодержащего волокна содержание водорастворимых солей составляет 5,21 г/л. В технологическом процессе образования исследуемого продукта в производстве используется неорганическая кислота, которая влияет на значение рН солевой и водной вытяжки. Были изучены физико-химические свойства волокна (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические свойства целлюлозосодержащего волокна

Показатель, единица измерения	Значение
Азот/белок, %	2,43 ± 0,24*/13,85 ± 1,39*
Крахмал, %	25,10 ± 5,02*
Зола/Зола, нерастворимая в HCl, %	1,16 ± 0,14*/0,04 ± 0,01*
Кальций, %	0,03 ± 0,01*
Целлюлоза, %	3,76 ± 0,75*
Фосфор, %	1,90 ± 0,38*
Жиры, %	4,40 ± 1,23*
Влажность, %	47,00 ± 9,40*
pH водной вытяжки (1:5), pH	4,22 ± 0,20*
pH водной вытяжки (1:10), pH	5,41 ± 0,20*
pH KCl 1M (1:5), pH	4,56 ± 0,20*
Солесодержание водной вытяжки (1:10), г/л	5,21 ± 1,04*
Органическое вещество, %	51,84 ± 10,37*

\*Значения расширенной неопределенности при коэффициенте охвата  $k = 2$  и уровне доверия приблизительно 95 %.

Источник: составлено И.Р. Курзенёвым, Т.А. Василенко.

Table 1. Physicochemical properties of cellulose fiber

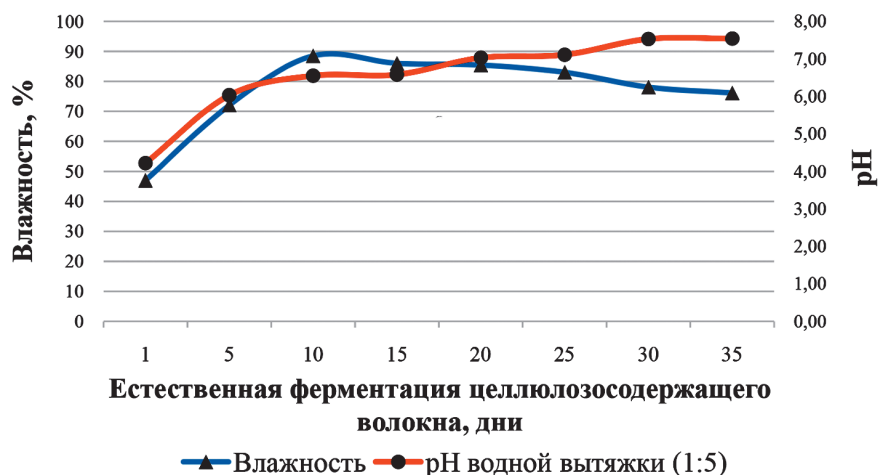
Properties, Unit of measurement	Values
Nitrogen/Protein, %	2.43 ± 0.24*/13.85 ± 1.39*
Starch, %	25.10 ± 5.02*
Ash/ Ash, Insoluble in HCl, %	1.16 ± 0.14*/0.04 ± 0.01*
Calcium, %	0.03 ± 0.01*
Cellulose, %	3.76 ± 0.75*
Phosphorus, %	1.90 ± 0.38*
Fat content, %	4.40 ± 1.23*
Humidity, %	47.00 ± 9.40*
pH Distilled water extract (1:5), pH	4.22 ± 0.20*
pH Distilled water extract (1:10), pH	5.41 ± 0.20*
pH Potassium chloride solution, 1M extract (1:5), pH	4.56 ± 0.20*
Salinity Distilled water extract (1:10), г/л	5.21 ± 1.04*
Organic matter, %	51.84 ± 10.37*

\*Standard coverage factor  $k = 2$  can yield an expanded uncertainty corresponding to a coverage probability of less than 95 %.

Source: compiled by I.R. Kurzenev, T.A. Vasilenko.

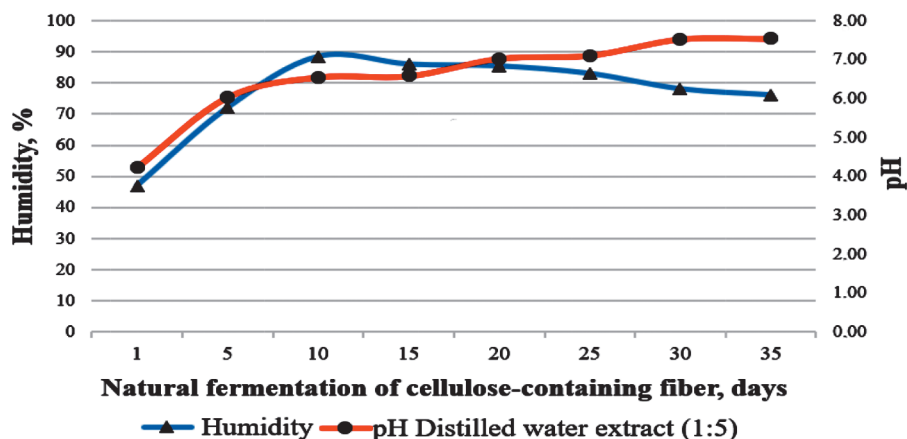
В процессе хранения (который сопровождался гниением побочного продукта) влажность изменялась с 47 до 76%, а значение pH водной вытяжки (1:5) с 4,22 до 7,54 единиц pH. Высокое содержание влажности наблюдалось на 10-й день хранения. Увеличение влажности объясняется разложением растительного материала, которое сопровождается выделением воды и углекислого газа. Изучена корреляция влажности и pH (рис. 2).

Зола, полученная при сжигании исследуемого образца при температуре  $(600 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , была проанализирована методом рентгеновской дифракции прибором ARL 9900 WorkStation (табл. 2). Исследование золы позволяет определить минеральную часть исследуемого образца, в котором преобладают следующие оксиды, %:  $\text{SiO}_2$  – до 51,30;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – до 17,63;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 10,25;  $\text{CaO}$  – 7,55;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 6,44;  $\text{K}_2\text{O}$  – 4,05.



**Рис. 2.** Динамика изменения pH водной вытяжки (1:5) и влажности целлюлозосодержащего волокна от количества дней естественной ферментации

Источник: составлено И.Р. Курзенёвым, Т.А. Василенко.



**Figure 2.** Dynamics of changes in pH of aqueous extract (1:5) and moisture content in cellulose-containing fiber depending on the number of days of natural fermentation

Source: compiled by I.R. Kurzenev, T.A. Vasilenko.

Таблица 2. Химический состав золы целлюлозосодержащего волокна

Оксид	Содержания, %
SiO <sub>2</sub>	50,65 ± 2,53*
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	16,96 ± 0,85*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,12 ± 0,51*
CaO	7,49 ± 0,38*
Na <sub>2</sub> O	6,26 ± 0,31*
K <sub>2</sub> O	3,97 ± 0,20*
MgO	1,86 ± 0,19*
SO <sub>3</sub>	1,16 ± 0,23*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,82 ± 0,16*

\*Значения расширенной неопределенности при коэффициенте охвата  $k = 2$  и уровне доверия приблизительно 95 %.

Источник: составлено И.Р. Курзенёвым, Т.А. Василенко.

Table 2. Content of elements in ash of cellulose fiber

Oxides	Value, %
SiO <sub>2</sub>	50.65 ± 2.53*
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	16.96 ± 0.85*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.12 ± 0.51*
CaO	7.49 ± 0.38*
Na <sub>2</sub> O	6.26 ± 0.31*
K <sub>2</sub> O	3.97 ± 0.20*
MgO	1.86 ± 0.19*
SO <sub>3</sub>	1.16 ± 0.23*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.82 ± 0.16*

\*Standard coverage factor  $k = 2$  can yield an expanded uncertainty corresponding to a coverage probability of less than 95%.

Source: compiled by I.R. Kurzenev, T.A. Vasilenko.

Определение токсичности водной вытяжки (1:10) из исследуемого образца проводилось в соответствии с требованиями аттестованных методик биотестирования на двух разных тест-объектах (табл. 3)<sup>1</sup>. По результатам биотестирования целлюлозосодержащие волокно относится к IV классу опасности (малоопасный).

Таблица 3. Степень негативного воздействия на окружающую среду

Тест-объект	Продолжительность наблюдений, часы	Оценка тестируемой пробы
<i>Ceriodaphnia affinis</i>	48	Наличие острого токсического действия. Безвредная кратность разбавления — 100
<i>Chlorella vulgaris Beijer</i>	22	Наличие токсического действия. Безвредная кратность разбавления — 100

Источник: составлено И.Р. Курзенёвым, Т.А. Василенко.

Table 3. The degree of negative impact on the environment

Unit	Hours after start of analysis	Conclusion
<i>Ceriodaphnia affinis</i>	48	The harmless dilution factor is 100
<i>Chlorella vulgaris Beijer</i>	22	The harmless dilution factor is 100

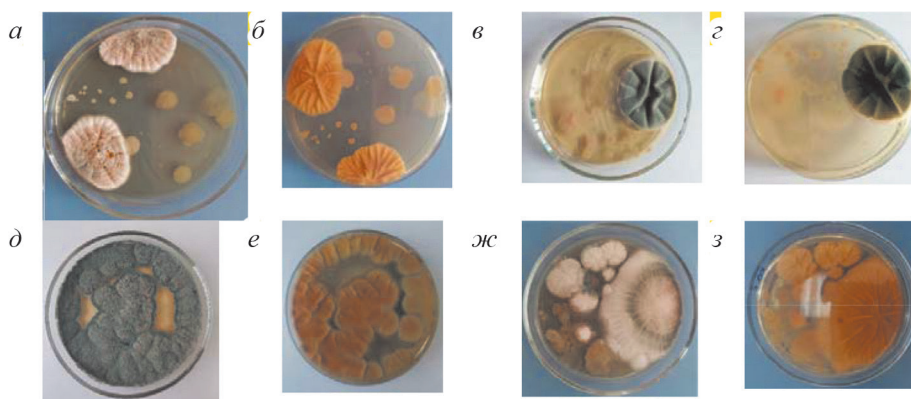
Source: compiled by I.R. Kurzenev, T.A. Vasilenko.

<sup>1</sup> Приказ Минприроды России от 31.03.2025 № 158 «Об утверждении критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.04.2025 № 82010). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=494395> (дата обращения: 09.04.2026); ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. Москва, 2014. 36 с.; Жмур Н.С. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний. Федеральный реестр ФР.1.39.2007.03221. Москва : АКВАРОС, 2007. 56 с.

## Результаты исследований

В качестве оценки микробиологической активности был выполнен посев на твердых агаризированных средах: агар Сабуро; питательная среда № 1 ГРМ и агар Эндо–ГРМ. Посев водной вытяжки из целлюлозосодержащего волокна (аликвота 100–200 мкл в зависимости от разбавлений (10, 15, 20, 30 раз) осуществлялся в следующие дни после отбора: 1, 10, 20, 35-й.

После посева на твердой питательной среде агар Сабуро водной вытяжки из исследуемого образца развивались плесневые грибы родов *Penicillium*, *Cladosporium* (рис. 3). Окраска колоний определяется главным образом цветом массы конидий и в меньшей степени – изменением с возрастом цвета мицелия и пигментов, выделяемых им в субстрат.



**Рис. 3.** Колонии мицелиальных грибов родов *Penicillium* (а, б, е–з), *Cladosporium* (в, г) на среде Сабуро

Источник: фото И.Р. Курзенёва.

**Figure 3.** Colonies of mycelial fungi of the genus *Penicillium* (а, б, е–з), *Cladosporium* (в, г) Sabouraud agar  
Source: photo by I.R. Kurzenev.

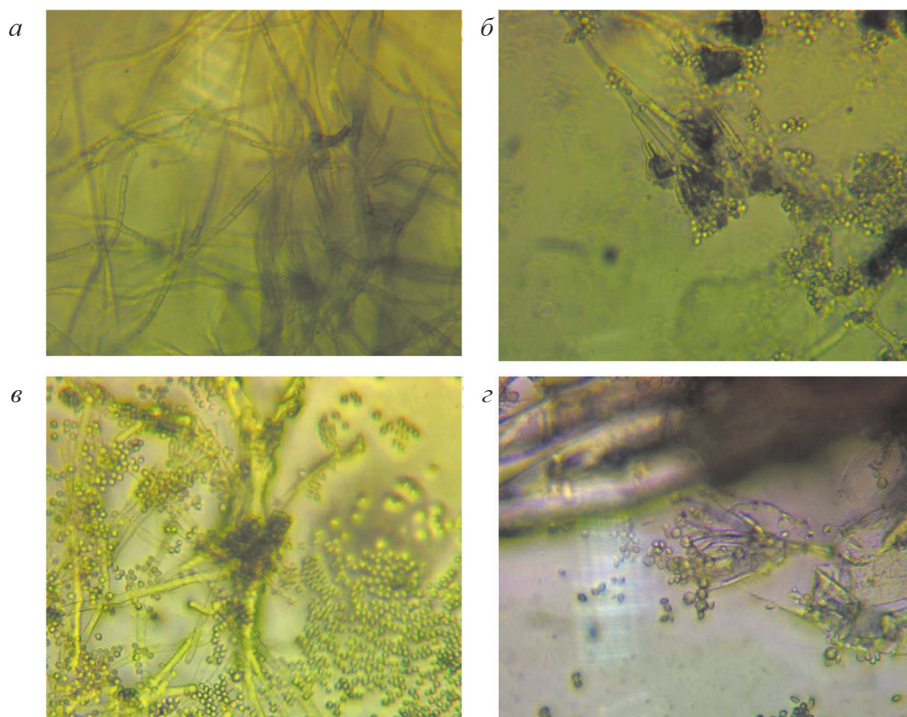
Микрофотографии спор и конидий представлены на рис. 4, для этих целей использовался микроскоп Levenhuk 870Т с цифровой камерой Levenhuk C800 NG 8М. Характеристики колоний мицелиальных грибов следующие:

– колонии рода *Penicillium* умеренно глубокие; плоские; края целые; мицелий в центре желтый, по краям белый; текстура хлопковая; реверс желтый; конидии в массе желтые; имеется экссудат (рис. 3, а, б). Микроскопическое строение гриба представлено на рис. 4, б;

– колонии рода *Cladosporium* умеренно глубокие, плоские; края целые; мицелий черный; текстура хлопковая; реверс черный; конидии в массе темные; экссудат отсутствует (рис. 3, в, г). Было исследовано микроскопическое строение гриба (рис. 4, а);

– колонии рода *Penicillium* умеренно глубокие; плоские; края целые; мицелий в центре буро-зеленый, по краям имеет сизо-зеленую окантовку; текстура хлопковая; реверс желтый; конидии в массе серо-зеленые; экссудат отсутствует (рис. 3 д, е). Микроскопическое строение гриба представлено на рис. 4, в;

– колонии рода *Penicillium* умеренно глубокие; плоские; края целые; мицелий белый, состоящий из сплетений гиф, восходит над субстратом; реверс желтый; экссудат отсутствуют (рис. 3, ж, з). Микроскопическое строение гриба представлено на рис. 4, г.



**Рис. 4.** Споры, спорангии и конидиеносцы мицелиальных грибов под микроскопом (увеличение 400х) родов *Cladosporium* (а) и *Penicillium* (б–г)

Источник: фото И.Р. Курзенёва.

**Figure 4.** Spores, sporangia and conidiophores of filamentous fungi under a microscope (magnification 400x) of the genera *Cladosporium* (a), *Penicillium* (б–г)

Source: photo by I.R. Kurzenev.

Для рода *Penicillium* характерно споровое строение (рис. 4, б–г), конидиеносцы септированные, на конце имеют кисточку, которая может быть трех- или четырехъярусная. Конидиеносцы заканчиваются одиночными клетками спор. Конидии рода *Cladosporium* формируются в виде длинных, практически не разветвленных конидиеносцев (рис. 4, а); конидии имеют бледно-оливковый цвет, гладкостенные.

На твердой питательной среде ГРМ-агар после посева водной вытяжки из исследуемого образца были обнаружены предположительно дрожжи родов *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces*, с характерным «хлебным» запахом и бактерии рода *Bacillus* (рис. 5).

Характеристики колоний рода *Bacillus* (рис. 5): колонии бактерий сухие, мелкоморщинистые, бархатистые, кремовые. Край колонии волнистый; диаметр колоний от 3 до 12 мм.



**Рис. 5.** Общий вид дрожжей родов *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* и бактерий рода *Bacillus* в чашках Петри на среде ГРМ-агар

Источник: фото И.Р. Курзенёва.

**Figure 5.** General appearance of yeasts of the genera *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* and bacteria of the genus *Bacillus* in Petri dishes on GRM agar medium

Source: photo by I.R. Kurzenev.

Характеристики колоний родов *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* (см. рис. 5): форма колоний круглая; диаметр колоний от 2 до 9 мм; цвет молочный или белый; поверхность гладкая. При старении цвет колоний темнеет. Клетки рода *Saccharomyces* имеют овальную форму, а рода *Schizosaccharomyces* – палочковидную.

Расчет количества колониобразующих единиц на грамм растительного волокна ( $X$ , КОЕ/г) с пересчетом на абсолютно сухую навеску осуществлялся по формуле

$$X = \frac{\sum CFU \cdot 10^n}{V \cdot k}, \quad (1)$$

где  $\sum CFU$  — количество колоний в одной чашке, шт.;  $k$  — коэффициент пересчета на абсолютно сухую навеску ( $1 - W$ );  $W$  — влажность образца, доли единицы;  $n$  — степень разведения, из которого сделан посев;  $V$  — объем аликвоты водной вытяжки из образца.

Результаты подсчета количества микроорганизмов представлена в табл. 4<sup>2</sup>.

С увеличением количества дней экспонирования наблюдалась тенденция к увеличению числа микроорганизмов в растительном волокне (табл. 4). На твердой питательной среде Эндо после посева водной вытяжки из исследуемого образца на 35-й день естественной ферментации были обнаружены колонии энтеробактерий рода *Escherichia*: лактозоотрицательные бактерии розового оттенка (рис. 6, а) и лактозоположительные малиново-красные колонии с металлическим блеском (рис. 6, б). Был проведен экспресс-тест на обнару-

<sup>2</sup> ГОСТ 33379-2015. Удобрения органические. Методы определения наличия патогенных и условно-патогенных микроорганизмов : официальное издание. Москва : Стандартинформ, 2016. 31 с.

жение цитохромоксидазы бактерий с использованием полосок OXItest, результат теста — отрицательный. Окраска по Граму показала наличие грамотрицательных бактерий.

Таблица 4. Расчет количества колониеобразующие единиц на грамм волокна на питательных средах

Дни с момента ферментации	Температура окружающей среды, °С	ГРМ-агар, КОЕ/г	Эндо-агар, КОЕ/г
1	+23	$18 \cdot 10^{15**}$	–
10	+18	$23 \cdot 10^{20**}$	–
30	+10	$28 \cdot 10^{20**}$	–
35	+7	$18 \cdot 10^{30**}$	$7 \cdot 10^{15}$

\*\* При  $n = 20, p < 0,05$ .

Источник: составлено И.Р. Курзёновым, Т.А. Василенко.

Table 4. Colony-forming unit

Days from the moment of selection	Ambient temperature, °C	Growth medium beef-extract agar, CFU/g	Growth medium Endo agar, CFU/g
1	+23	$18 \cdot 10^{15**}$	–
10	+18	$23 \cdot 10^{20**}$	–
30	+10	$28 \cdot 10^{20**}$	–
35	+7	$18 \cdot 10^{30**}$	$7 \cdot 10^{15}$

\*\* For  $n = 20, p < 0,05$ .

Source: compiled by I.R. Kurzenev, T.A. Vasilenko.

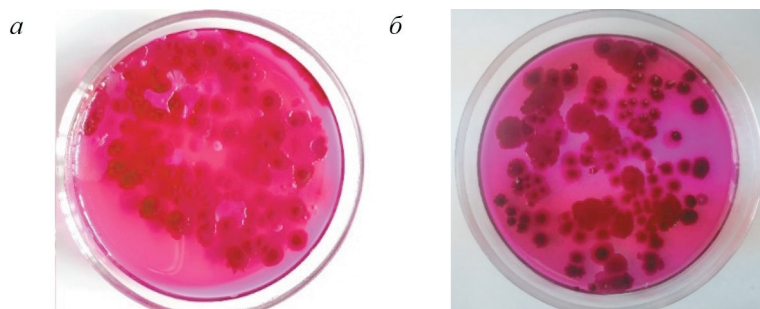


Рис. 6. Энтеробактерии рода *Escherichia*:

а — лактозоотрицательные бактерии розового оттенка; б — лактозоположительные малиново-красные колонии с металлическим блеском

Источник: фото И.Р. Курзёнова.

Figure 6. Enterobacteriaceae of the genus *Escherichia*:

а — lactose-negative bacteria of pink color; б — lactose-positive colonies of raspberry-red color with a metallic sheen.

Source: photo by I.R. Kurzenev.

## Результаты исследований

Целлюлозосодержащее волокно является побочным продуктом в производстве кормовых добавок микробиологическим способом для животных. Образуется из зерновых культур после ферментации. Продукт состоит из сле-

дующих компонентов: влажность — 47,00 %; зола — 1,16 %; органическое вещество — 51,84 % (в том числе крахмал — 25,10 %; жиры — 4,40 %). В золе преобладают оксиды: кремния  $\text{SiO}_2$  — до 51,30 %; фосфора  $\text{P}_2\text{O}_5$  — до 17,63 %; алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — до 10,25 %. Содержание азота и фосфора в исследуемом образце составляет 2,43 и 1,90 %. Исследована зависимость изменения pH, влажности от времени хранения целлюлозосодержащего волокна. В процессе естественной ферментации увеличивается влажность с 47 до 76 %, а также стабилизируется значение pH с 4,22 до 7,54. Был изучен микробиоценоз путем посева водной вытяжки из образца на твердые агаризованные среды. Выявлены микроорганизмы, относящиеся к родам: *Penicillium*, *Cladosporium*, *Bacillus*, *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* и *Escherichia*. Количество микроорганизмов возрастает с ростом срока хранения продукта, который является биоразлагаемым и подвержен гниению. Степень негативного воздействия на окружающую среду — IV.

### Список литературы

- [1] Лопата Ф.Ф. Ветеринарно-санитарная оценка органических отходов животноводства // Аграрный вестник Урала. 2008. № 2 (44). С. 72–75. EDN: IJERAB
- [2] Sun L., Liu T., Müller B., Schnürer A. The microbial community structure in industrial biogas plants influences the degradation rate of straw and cellulose in batch tests // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2016. Vol. 9. Article no. 128. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0543-9> EDN: WVNABR
- [3] Gallego-García M., Moreno A.D., González A., Negro M.J. Efficient use of discarded vegetal residues as cost-effective feedstocks for microbial oil production // Biotechnology for Biofuels. 2023. Vol. 16. Article no. 21. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02268-5>
- [4] Рафикова Г.Ф., Столярова Е.А., Мухаматдырова С.Р., Логинов О.Н. Микробиологическая переработка отходов животноводства в концентрированное органическое удобрение // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 7. С. 24–29. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-7-24-29> EDN: HDDXFN
- [5] Шамцян М.М., Колесников Б.А., Клепиков А.А., Касьян О.В. Биотехнологическая переработка отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности // Российский химический журнал. 2011. Т. 55. № 1. С. 17–25. EDN: NTXWHZ
- [6] Семёнова М.В., Гусаков А.В., Телицин В.Д., Синицын А.П. Ферментативная деструкция целлюлозы: особенности кинетического взаимодействия литических полисахаридмонооксигеназ и индивидуальных целлюлаз // Прикладная биохимия и микробиология. 2021. Т. 57. № 5. С. 477–484. EDN: DOQRDD
- [7] Литти Ю. В., Русскова Ю.И., Журавлёва Е.А., Паришина С.Н., Ковалёв А.А., Ковалёв Д.А., Ножевникова А.Н. Электрометаногенез — перспективная биотехнология анаэробной переработки органических отходов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2022. Т. 58. № 1. С. 23–43. EDN: IPOYRV
- [8] Брюханов А.Л., Хижняк Т.В. Использование сульфатредуцирующих бактерий в биоремедиации от тяжелых металлов и металлоидов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2023. Т. 59. № 2. С. 133–149. <http://doi.org/10.31857/S0555109923020034> EDN: LKVILK
- [9] Ильина Г.В., Сашенкова С.А., Ильин Д.Ю., Дашкина А.Р. Экологически обоснованные приемы селекционного отбора штаммов микромицетов с высокой целлюлозной активностью // Нива Поволжья. 2022. 1 (61). Article no. 1010. EDN: YYOUHN

- [10] Пендюрин Е.А., Рыбина С.Ю., Смоленская Л.М., Латыпова М.М. Исследование некоторых физико-химических показателей искусственно созданных почвосмесей // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 9. С. 27–31. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-9-27-31> EDN: ZVEMHF
- [11] Ножевникова А.Н., Миронов В.В., Бочкова Е.А., Литти Ю.В., Русскова Ю.И. Состав микробного сообщества на разных стадиях компостирования, перспектива получения компоста из муниципальных органических отходов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология, 2019. Т. 55. № 3. С. 211–221. <https://doi.org/10.1134/S0555109919030103>
- [12] Saha N., Mukherjee D., Sen S., Sarkar A., Bhattacharaya K. K., Mukhopadhyay N., Patra P.K. Application of highly efficient lignocellulolytic fungi in cocomposting of paddy straw amended poultry droppings for the production of humus rich compost // Compost Science & Utilization. 2012. Vol. 20. Iss. 4. P. 239–244. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2012.10737054> EDN: KRZVAL
- [13] Akintunde M.O., Adebayo-Tayo B. C., Ishola M.M., Zamani A., Horváth, I.S. Bacterial cellulose production from agricultural residues by two *Komagataeibacter* sp. strains // Bioengineered. 2022. Vol. 13. Iss. 4. P. 10010–10025. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2062970> EDN: GVWSUP
- [14] Назарова Н.Б., Лясыкина Е.В., Ревин В.В. Получение бактериальной целлюлозы при совместном культивировании *Komagataeibacter sucrofermentans* с продуцентами декстрана *Leuconostoc mesenteroides* и ксантана *Xanthomonas campestris* // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 60. С. 23–42. <https://doi.org/10.17223/19988591/60/215> EDN: BFZUBC

## References

- [1] Lopata FF. Veterinary and sanitary assessment of organic waste from livestock farming. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2008;(2):72–75. (In Russ.) EDN: IJERAB
- [2] Sun L, Liu T, Müller B, Schnürer A. The microbial community structure in industrial biogas plants influences the degradation rate of straw and cellulose in batch tests. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2016;9:128. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0543-9> EDN: WVNABR
- [3] Gallego-García M, Moreno AD, González A, Negro MJ. Efficient use of discarded vegetal residues as cost-effective feedstocks for microbial oil production. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2023;16:21. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02268-5>
- [4] Rafikova GF, Stolyarova EA, Muhamatdyarova SR, Loginov ON. Microbiological processing of livestock waste into concentrated organic fertilizer. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(7):24–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-7-24-29> EDN: HDDXFN
- [5] Shamtsyan MM, Klepikov AA, Kolesnikov BA, Kasyan OV. Biotechnological processing of agricultural and food industry waste. *Rossiiskij Himicheskij Zhurnal*. 2011;55(1):17–25. (In Russ.) EDN: NTXWHZ
- [6] Semenova MV, Gusakov AV, Telitsin VD, Sinitsyn AP. Enzymatic destruction of cellulose: characteristics of the kinetic interaction of lytic polysaccharide monoxygenases and individual cellulases. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2021;57(5):618–625. (In Russ.) EDN: TIZWGP
- [7] Litt YV, Russkova YI, Zhuravleva EA, Parshina SN, Kovalev AA, Kovalev DA, Nozhevnikova AN. Electromethanogenesis: a promising biotechnology for the anaerobic treatment of organic waste. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2022;58(1):19–36. (In Russ.) EDN: KHEFLN

- [8] Bryukhanov AL, Khijniak TV. Application of sulfate-reducing bacteria in bioremediation from heavy metals and metalloids (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2023;59(2):133–149 (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0555109923020034> EDN: LKVILK
- [9] Ilyina GV, Sashenkova SA, Ilyin DYU, Dashkina AR. Ecologically justified methods of selection of strains of micromycetes with high cellulase activity. *Volga Region Farmland*. 2022;1(12):1010. (In Russ.) EDN: GIKRWU
- [10] Pendyurin EA, Rybina SYU, Smolenskaya LM, Latypova MM. Research on some physicochemical parameters of artificially created soil mixtures. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(9):27–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-9-27-31> EDN: ZVEMHF
- [11] Nozhevnikova AN, Mironov VV, Bochkova EA, Litti YuV, Russkova YuI. Composition of the microbial community at different stages of composting, prospects for obtaining compost from municipal organic waste (review). *Applied biochemistry and microbiology*. 2019;55(3):211–221. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0555109919030103>
- [12] Saha N, Mukherjee D, Sen S, Sarkar A, Bhattacharaya KK, Mukhopadyay N, Patra PK. Application of highly efficient lignocellulolytic fungi in cocomposting of paddy straw amended poultry droppings for the production of humus rich compost. *Compost Science & Utilization*. 2012;20(4):239–244. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2012.10737054> EDN: KRZVAL
- [13] Akintunde MO, Adebayo-Tayo BC, Ishola MM, Zamani A, Horváth IS. Bacterial cellulose production from agricultural residues by two *Komagataeibacter* sp. strains. *Bioengineered*. 2022;13(4):10010–10025. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2062970> EDN: GVWSUP
- [14] Nazarova NB, Liyaskina EV, Revin VV. The production of bacterial cellulose by co-cultivation of *Komagataeibacter sucrofermentans* with dextran producers *Leuconostoc mesenteroides* and xanthan *Xanthomonas campestris*. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2022;60:23–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/19988591/60/2> EDN: BFZUBC

### Сведения об авторах:

*Курзенёв Иван Романович*, аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Российская Федерация, 308012, г. Белгород, Белгородская обл., ул. Костюкова, д. 46. ORCID: 0000-0002-2975-8152; eLIBRARY SPIN-код: 4233-9699; AuthorID: 1078647. E-mail: spandwaryandex@gmail.com

*Василенко Татьяна Анатольевна*, кандидат технических наук, доцент, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Российская Федерация, 308012, г. Белгород, Белгородская обл., ул. Костюкова, д. 46. ORCID: 0000-0003-4908-4906; eLIBRARY SPIN-код: 2911-5489; AuthorID: 755876. E-mail: land-vna78@list.ru

### Bio notes:

*Ivan R. Kurzenev*, graduate student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St, Belgorod region, Belgorod, 308012, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2975-8152; eLIBRARY SPIN-код: 4233-9699; AuthorID: 1078647. E-mail: spandwaryandex@gmail.com

*Tatyana A. Vasilenko*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St, Belgorod region, Belgorod, 308012, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-4908-4906; eLIBRARY SPIN-код: 2911-5489; AuthorID: 755876. E-mail: land-vna78@list.ru

## ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-321-333

EDN: PEWZWI

УДК 911.52

Научная статья / Research article

### Геоэкологическая оценка структурной устойчивости горного города на основе морфологического анализа и метода CRITIC

Д.Е. Кучер , В.А. Дмитриев  *Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация* [dmitrieff200@yandex.ru](mailto:dmitrieff200@yandex.ru)

**Аннотация.** Горные города характеризуются высокой пространственной неоднородностью, ограниченностью пригодных для застройки территорий и повышенной уязвимостью к антропогенному воздействию. Авторами представлен подход к оценке пространственной структуры и экологической устойчивости горных городов на основе интегрального индекса структурно-планировочных показателей, апробированный на примере г. Владивосток. Индекс сформирован с использованием показателей, характеризующих структуру водно-зеленого каркаса города. Структурные элементы зеленой инфраструктуры выделены методом морфологического пространственного анализа (MSPA), веса показателей определены методом CRITIC с учетом их вариабельности и взаимной корреляции. Полученный индекс позволил выявить выраженную пространственную дифференциацию экологической устойчивости территории Владивостока, связанную с особенностями рельефа, планировочной структуры и функционального зонирования. Результаты исследования демонстрируют возможности использования предложенного подхода для выявления уязвимых и резервных территорий и его применения при зонировании приоритетов озеленения, установления природоохранных режимов и пространственного планирования горных городов.

**Ключевые слова:** экологическая устойчивость, зеленая инфраструктура, MSPA-анализ

**Вклад авторов.** *Дмитриев В.А.:* формулирование идеи; разработка и проектирование методологии исследования; реализация компьютерного кода и вспомогательных алгоритмов; формальный анализ; проведение исследования; создание рукописи и ее редактирование; визуализация. *Кучер Д.Е.:* формулирование исследовательских целей и задач; администрирование проекта; руководство исследованием. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Кучер Д.Е., Дмитриев В.А., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Заявление о доступности данных.** Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены автором по обоснованному запросу в связи с существенным объемом.

**История статьи:** поступила в редакцию 24.12.2025; доработана после рецензирования 13.02.2026; принята к публикации 06.02.2026.

**Для цитирования:** Кучер Д.Е., Дмитриев В.А. Геоэкологическая оценка структурной устойчивости горного города на основе морфологического анализа и метода CRITIC // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 321–333. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-321-333> EDN: PEWZWI

## Geocological assessment of the structural stability of a mountain city based on morphological analysis and the CRITIC method

Dmitry E. Kucher , Vladimir A. Dmitriev  

*RUDN University, Moscow, Russian Federation*  
dmitrieff200@yandex.ru

**Abstract.** Mountain cities are characterized by high spatial heterogeneity, limited territories suitable for development, and increased vulnerability to anthropogenic impact. The research presents an approach to assessing the spatial structure and environmental sustainability of mountain cities based on an integral index of structural and planning indicators, tested on the example of Vladivostok. The index is formed using indicators characterizing the structure of the city's water-green framework. The structural elements of the green infrastructure were identified by the method of morphological spatial analysis (MSPA), the weights of the indicators were determined by the CRITIC method, taking into account their variability and mutual correlation. The obtained index made it possible to identify a pronounced spatial differentiation of the ecological stability of the territory of Vladivostok, related to the features of the relief, planning structure and functional zoning. The results of the study demonstrate the possibilities of using the proposed approach to identify vulnerable and reserve territories and its application in the zoning of landscaping priorities, the establishment of environmental protection regimes and spatial planning of mountain towns.

**Keywords:** mountain cities, geocological assessment, environmental sustainability, green infrastructure, MSPA analysis

**Authors' contribution.** *V.A. Dmitriev:* ideas; development and design of methodology; implementation of computer code and supporting algorithms; formal analysis; investigation; writing — review & editing; visualization. *D.E. Kucher:* formulation or evolution of overarching

research goals and aims; management and coordination responsibility for the research activity planning and execution; supervision. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

**Conflicts of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Statement on the use of artificial intelligence technologies.** No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

**Data availability statement.** The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request due to the substantial volume.

**Article history:** received 24.12.2025; revised 13.02.2026; accepted 06.02.2026.

**For citation:** Kucher DE, Dmitriev VA. Geocological assessment of the structural stability of a mountain city based on morphological analysis and the CRITIC method. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):321–333. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-321-333> EDN: PEWZWI

## Введение

Горные города занимают особое место среди урбанизированных территорий, формируясь в условиях геоморфологической неоднородности, высокой степени расчлененности территории и выраженной вертикальной зональности. С точки зрения экологического благополучия горные города представляют собой особенно чувствительные к антропогенному воздействию территории. В широком смысле к горным городам допустимо отнести те населенные пункты, которые полностью или существенно расположены в пределах горных территорий [1].

В рамках настоящего исследования под границами горных территорий понимаются предложенные в рамках работ [2; 3].

Горные города отличаются ограниченностью подходящих для застройки территорий, высокой стоимостью перемещения, фрагментированностью, большой степенью зависимости от опасных геологических процессов. В этих условиях особую значимость приобретает анализ пространственной структуры горных городов, позволяющий выявить закономерности взаимодействия рельефа, застройки, транспортной сети и природных элементов [1].

Согласно используемым данным горные территории занимают 27,6 % территории Российской Федерации, в их пределах расположено 186 населенных пунктов, отнесенных к городским, и проживает примерно 55,1 млн человек (2024 г.)<sup>1</sup>.

В рамках настоящей работы предлагается к рассмотрению результат исследования пространственной структуры и экологической устойчивости горных городов Российской Федерации на примере города Владивостока, выпол-

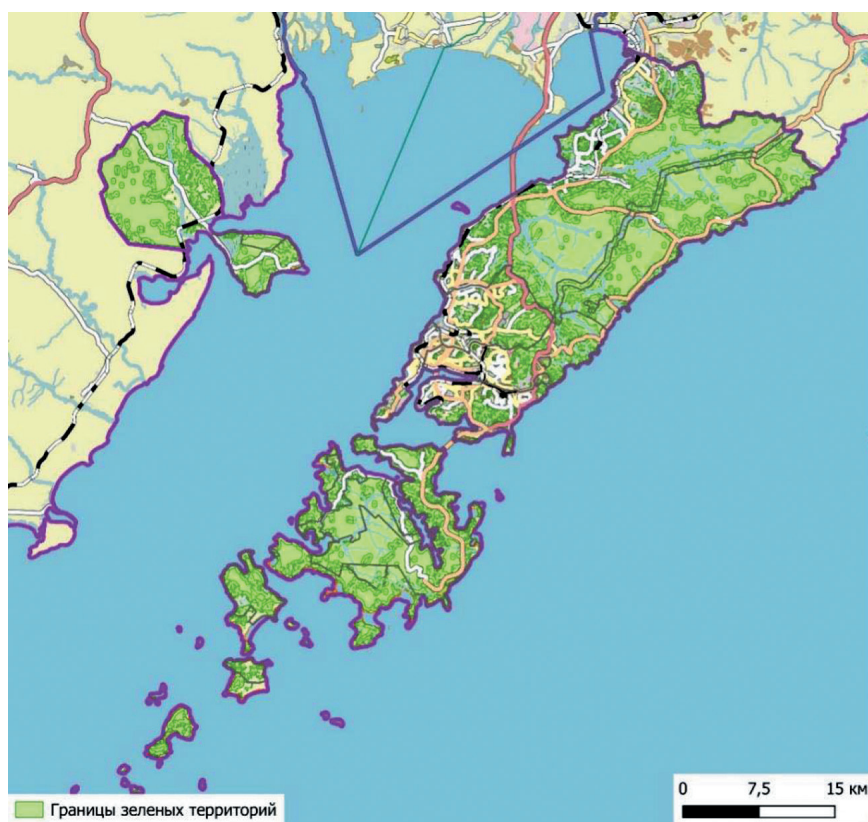
<sup>1</sup> Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям // Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. URL: <https://www.rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 26.10.2026).

ненный в формате пространственного индекса структурных планировочных показателей. Индекс ориентирован на выявление и количественную оценку ключевых элементов «зеленого» каркаса города и степени их интеграции в планировочную структуру территории. Таким образом, *целью исследования* является разработка и апробация пространственного индекса структурных показателей горных городов.

## Материалы и методы

Владивосток — административный и экономический центр Приморского края и Дальневосточного федерального округа. Город располагается на полуострове Муравьева-Амурского, в состав города также включены острова Русский, Попова и др. В рамках исследования г. Владивосток анализировался в пределах административной территории городского округа Владивосток площадью 757 км<sup>2</sup>. Территория города разнообразна в рельефном плане — представлены приморские равнины, поймы рек, низкогорья и среднегорья.

Зеленый каркас городов традиционно рассматривается как экологическое ядро города (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема зеленой инфраструктуры Владивостока

Источник: выполнено В.А. Дмитриевым.

Зеленые зоны являются зонами концентрации биоразнообразия, депонирования загрязнителей, защитой от эрозии [4]. Озелененные территории рассматриваются многими исследователями как ядра жизнеспособных популяций городских животных и растений [4–9].

К параметрам зеленых зон было предложено добавить «голубую» составляющую инфраструктуры города. «Голубой» каркас города выполняет ключевую роль в дренаже и отводе стока, кроме того, для горных городов водные объекты являются основным источником пресной воды, формируют морфологическую структуру городов [10]. Роль водного каркаса обуславливается необходимостью управлять не только водными ресурсами, но и снижать влияние опасных природных процессов, таких как сели, наводнения, уменьшать влияние городского острова тепла, поддерживать биоразнообразие [11; 12].

Расчет переменных производился как на всю территорию г. Владивосток, так и по сетке. Сетка представляла собой совокупность квадратов 1,5×1,5 км, охватывавших исключительно территорию административных границ г.о. Владивосток. В табл. 1 представлен свод показателей индекса.

Таблица 1. Анализируемые переменные

№	Переменная	Единица измерения	Краткое описание
1.	Доля «изолированных» зеленых территорий	%	
2.	Доля «ядер»	%	Доля «ядерных» участков зеленых территорий от общей площади. «Ядерные» участки занимали суммарно 42,1 % территории г.о. Владивосток. Медианное значение доли по сетке составило 21,2 %, медианная площадь по секторам — 17,2 га
3.	Фрагментированность зеленых территорий	шт./га	Количество индивидуальных зеленых объектов на квадратный километр. Медианное значение фрагментированности составило 2,67 шт./га
4.	Обеспеченность зелеными зонами на 1 человека в пределах критериев доступности	м <sup>2</sup> /чел.	Количество га зеленых зон на 1 человека в пределах пешей доступности от жилых зданий
5.	Встречаемость краснокнижных видов на 1 га	шт./га	Количество краснокнижных видов, зафиксированных в пределах территории, в пересчете на площадь
6.	Доля закрытых русел	%	Доля русел, закрытых канализацией от общей протяженности русел в пределах города
7.	Плотность водной сети	км/км <sup>2</sup>	Суммарная длина открытых водотоков на единицу площади
8.	Доля водоохраных зон, сохранивших природный характер	%	Доля водоохраных зон без застройки и искусственного покрытия

Источник: составлено В.А. Дмитриевым.

Переменные, связанные с зелеными территориями, основываются на данных [13]. В качестве «зеленой» рассматривались территории с плотностью крон более 10 %, что позволило отсечь случайно определенные пиксели. Всего территория г. Владивосток в пределах административных границ озеленена на 55,0 %.

Переменные, связанные с биоразнообразием, были рассчитаны на основе данных наблюдения пользователей открытой платформы iNaturalist<sup>2</sup>. Параметры, связанные с водными объектами, были получены на основе данных Open Street Map. Население по зданиям было рассчитано исходя из средней обеспеченности жильем в 26,6 м<sup>2</sup> жилой площади на человека<sup>3</sup> и данных о жилой площади домов<sup>4</sup>.

Связность зеленых территорий с водными объектами определялась на основе пересечения единиц зеленых территорий — скверов, парков и лесных массивов с водоохранными зонами рек и моря. Связность составила 46,1 % в среднем по городскому округу.

Доля водоохраных зон, сохранивших природный характер, оценивалась на основе открытых данных и данных дистанционного зондирования,

В рамках настоящей работы применены методы геоинформационного моделирования, включая MSPA-анализ, проведены предобработка данных, проверка независимости показателей, оценка весов исследуемых переменных, расчет интегрального индекса.

MSPA-анализ — это метод пространственного анализа, основанный на математической морфологии растровых данных и предназначенный для формализованной классификации зеленых территорий на структурные элементы экологического каркаса (ядра, мосты, коридоры, ответвления, края и изолированные пятна) с целью оценки целостности, связности и пространственной организации зеленой инфраструктуры города [14]. В рамках настоящей работы в результате MSPA-анализа было выделено 9 типов зеленых территорий, подробное описание дано в табл. 2.

Обеспеченность зелеными зонами на 1 человека в пределах критериев доступности рассчитывалась исходя из площади зеленого объекта и его доступности. Парки и зеленые территории допустимо разделить на следующие категории: парки районного значения, парки общегородского значения, парки регионального и федерального значения, однако в рамках настоящего исследования парки регионального и федерального значения не выделялись<sup>5</sup>. Также на основании регионального критерия г. Москвы<sup>6</sup> допустимо выделить

<sup>2</sup> iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/> (дата обращения: 26.01.2026).

<sup>3</sup> Объем введенного в эксплуатацию жилья в Приморье вырос на 7 % // РБК : официальный сайт. URL: <https://prim.rbc.ru/prim/interview/19/11/2025/691cfe979a794767fc2b1850?ysclid=mnofm8ukyh293640682> (дата обращения: 26.01.2026).

<sup>4</sup> Открытые данные // Фонд развития территорий. URL: <https://витрина.фрт.рф/opendata?gid=2213474&page=1&pageSize=32> (дата обращения: 26.01.2026).

<sup>5</sup> СП 475.1325800.2020. Свод правил. Парки. Правила градостроительного проектирования и благоустройства (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 22.01.2020 № 26/пр). URL: <https://sro-a.ru/upload/medialibrary/b54/SP-475.1325800.2020.-Svod-pravil.-Parki.-Pravila-gradstroit.pdf?ysclid=mnofpwr051357199787> (дата обращения: 26.01.2026).

<sup>6</sup> Постановление Правительства Москвы от 06.08.2002 № 623-ПП «Об утверждении Норм и правил проектирования комплексного благоустройства на территории города Москвы МГСН 1.02-02». URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/4323/623-PP.ttf> (дата обращения: 26.01.2026).

скверы как единицы зеленой инфраструктуры, площадью меньше парка. В табл. 3 представлены критерии выделения различных типов зеленой инфраструктуры и рекомендации по их доступности.

Таблица 2. Классы зеленой инфраструктуры, полученные в результате MSPA-анализа

№	Класс	Описание
1.	Ареал	Внутренние части относительно крупных ядер
2.	Внутренний буфер	Периферийная полоса по периметру ядра
3.	Залив	Перфорация, разрыв в краевой части ядра, связанная с запечатанной площадью
4.	Коридор	Элемент, соединяющий между собой два любых ядерных ареала
5.	Край	Периферийная полоса по периметру ядра
6.	Остров	Изолированный фрагмент
7.	Ответвление	Частично изолированный фрагмент, соединенный с краем ядерного ареала
8.	Петля	Элемент, причленяющий к ядру небольшое пространство неозеленной территории
9.	Разрыв	Небольшой по площади разрыв внутреннего ареала, раскрывающий пиксели неозеленной территории, со всех сторон окруженный зелеными зонами

Источник: составлено В.А. Дмитриевым с использованием [15].

Таблица 3. Критерии выделения типов зеленой инфраструктуры

№	Тип зеленой инфраструктуры	Критерий площади	Критерий доступности
1.	Сквер	До 0,5 га	400 м
2.	Парк районного значения	2–10 га	20 мин
3.	Парк общегородского значения	Более 10 га	45 мин

Источник: составлено В.А. Дмитриевым с использованием: СП 475.1325800.2020. Свод правил.

Парки. Правила градостроительного проектирования и благоустройства (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 22.01.2020 № 26/пр).

URL: <https://sro-a.ru/upload/medialibrary/b54/SP-475.1325800.2020.-Svod-pravil.-Parki.-Pravila-gradostroitoi.pdf?ysclid=mnofpwr051357199787> (дата обращения: 26.01.2026);

Постановление Правительства Москвы от 06.08.2002 № 623-ПП «Об утверждении Норм и правил проектирования комплексного благоустройства на территории города Москвы МГСН 1.02-02». URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/4323/623-PP.rtf> (дата обращения: 26.01.2026).

Таким образом, обеспеченность скверами была рассчитана на основе создания маски в 400 м вокруг жилых зданий, обеспеченность парками районного значения была рассчитана посредством создания маски в 20 мин пешего пути при пересчете на стоимость перемещения с учетом уклона поверхности и средней скорости пешей ходьбы, парк общегородского значения — маской в 45 мин аналогичным способом. Общая обеспеченность складывалась из суммарной площади доступных скверов, парков районного и общегородского значения.

Оценка биоразнообразия базировалась на основе расчета частоты встречаемости уникальных видов и уникальных краснокнижных видов на 1 га площади территории и участка сетки. Доля закрытых русел оценивалась на основе данных дистанционного зондирования, полученных из открытых источников и данных open street map (OSM).

Предобработка данных включала в себя заполнение пропусков при расчете переменных доли туннелированных рек, площади «изолированных» и «ядерных» зеленых зон, плотности водных объектов, расчете площадей. Выбросов и нарушений в данных не обнаружено.

Независимость показателей оценивалась на основе расчета корреляции Спирмана. Выбор данного метода основан на непараметрическом характере переменных и отсутствии предпосылок к выявлению нормальности распределения данных [16]. В табл. 4 представлен расчет коэффициента Спирмана для анализируемых данных.

Таблица 4. Коэффициент Спирмана для переменных

№	Переменная	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Доля «изолированных» зеленых территорий	1,00	–0,51	0,76	–0,13	0,20	0,10	0,03	0,41
2.	Доля «ядер»	–0,51	1,00	–0,34	0,45	–0,03	0,00	0,28	–0,16
3.	Фрагментированность зеленых территорий	0,76	–0,34	1,00	–0,06	0,17	0,08	0,05	0,35
4.	Обеспеченность зелеными зонами на 1 человека в пределах критериев доступности	–0,13	0,45	–0,06	1,00	0,10	0,06	0,25	0,03
5.	Встречаемость краснокнижных видов на 1 га	0,20	–0,03	0,17	0,10	1,00	0,03	0,11	0,13
6.	Доля закрытых русел	0,10	0,00	0,08	0,06	0,03	1,00	0,31	0,13
7.	Плотность водной сети	0,03	0,28	0,05	0,25	0,11	0,31	1,00	0,30
8.	Доля водоохранных зон, сохранивших природный характер	0,41	–0,16	0,35	0,03	0,13	0,13	0,30	1,00

Источник: составлено В.А. Дмитриевым.

Анализ независимости переменных показал существенную связь между «изолированными» зелеными зонами и фрагментированностью — 0,76, а также существенную связь между «изолированными» и «ядерными» зелеными зонами. Поскольку аналитически данные показатели различны и позволяют оценить не только абсолютное значение площади «изолированных» зеленых зон, но и их реальное распределение на участки, так как они могут быть и относительно крупными, и относительно мелкими, обе переменные были оставлены в анализе. Кроме того, далее, в рамках расчета весов была учтена взаимосвязь показателей, что потенциально снизило последствия зависимости переменных.

Индекс структурных показателей водно-зеленой инфраструктуры г.о. Владивосток основывался на сумме нормированных, распределенных на положительные и отрицательные, показателей с поправкой на вес показателя. Общая формула индекса структурных показателей выглядела следующим образом:

$$I_{\text{ст}} = \sum(X_{\text{норм}} \cdot \alpha), \quad (1)$$

где  $X_{\text{норм}}$  — нормированное значение переменной;  $\alpha$  — вес переменной.

Нормирование переменных основывалось на Min-Max-нормализации. Значение переменной — на положительной или отрицательной оценке критерия. Так, к отрицательным относились доля туннелированных рек и фрагментированность зеленых территорий.

Веса переменных рассчитывались на основе метода Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) — метода многокритериального принятия решений, который позволяет определять веса показателей на основе их разброса значений и корреляции с другими признаками [17]. Общая формула расчета веса переменной [17]:

$$\alpha_j = \frac{std(X_{norm_j}) \cdot \sum (1 - |r_{jk}|)}{\sum_{j=1}^m (std(X_{norm_j}) \cdot \sum (1 - |r_{jk}|))}, \quad (2)$$

где  $X_{norm}$  — нормированное значение переменной;  $r_{jk}$  — значение корреляции Спирмана.

Веса переменных, полученных в результате расчетов, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Веса, полученные по методу CRITIC

№	Переменная	Вес CRITIC
1.	Доля «изолированных» зеленых территорий	0,0811
2.	Доля «ядер»	0,2051
3.	Фрагментированность зеленых территорий	0,1163
4.	Обеспеченность зелеными зонами на 1 человека в пределах критериев доступности	0,2617
5.	Встречаемость краснокнижных видов на 1 га	0,0493
6.	Доля закрытых русел	0,1408
7.	Плотность водной сети	0,1192
8.	Доля водоохраных зон, сохранивших природный характер	0,0265

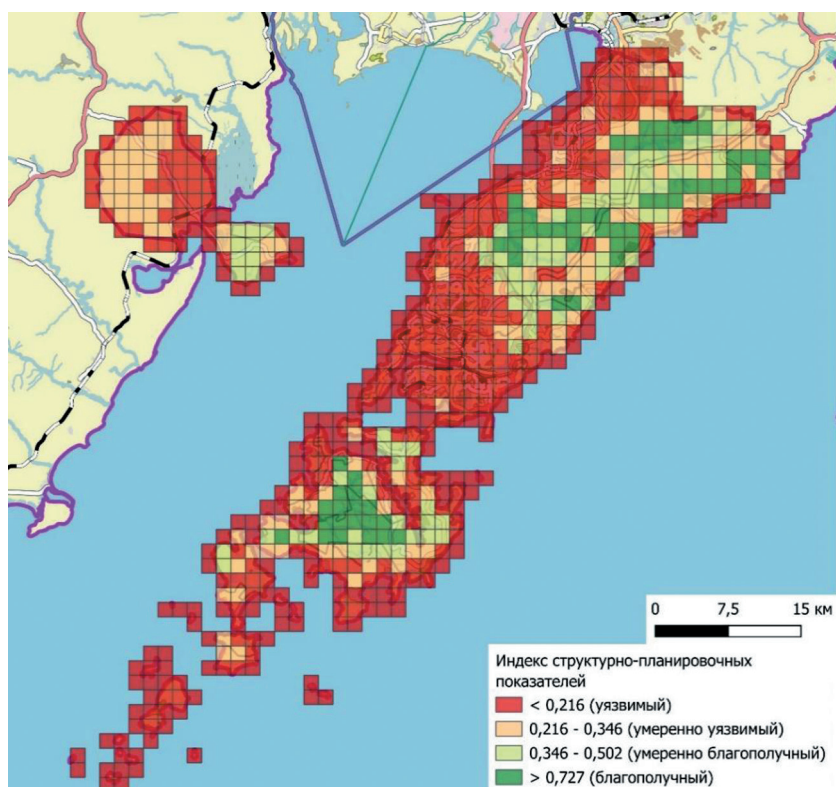
Источник: составлено В.А. Дмитриевым.

Анализ весов переменных показывает, что математически наиболее «сильной» переменной является обеспеченность зелеными зонами, далее — доля «ядер» и доля закрытых русел. Наименее «сильные» переменные — доля водоохраных зон, сохранивших природный характер, встречаемость краснокнижных видов, доля «изолированных» зеленых территорий.

## Результаты

Получен интегральный индекс структурных планировочных показателей в пределах г.о. Владивосток (рис. 2).

В рамках анализа индекс был разделен на четыре класса по методу Дженкса: уязвимый, умеренно уязвимый, умеренно благополучный и благополучный. Среднее значение индекса по городу составило 0,25.



**Рис. 2.** Категории индекса

Источник: выполнено В.А. Дмитриевым.

Уязвимый класс индекса характеризовался наибольшей долей «изолированных» зеленых территорий, наибольшим числом отдельных зеленых участков, долей туннелированных рек. Также для этого класса характерна наименьшая обеспеченность зелеными зонами. Значение индекса в пределах класса — менее 0,216.

Умеренно уязвимый класс отличается сильной дифференцированностью показателей — встречаемость высоких долей «изолированных» и «ядерных» участков зеленых зон примерно одинакова. Фиксируется рост обеспеченности зелеными зонами, почти отсутствуют туннелированные реки. Значение индекса — от 0,217 до 0,346.

Умеренно благополучный класс характеризуется наличием существенного числа ядерных участков и локальных связей, но при этом дифференцированным показателем обеспеченности озелененными территориями. Туннелированные реки, «изолированные» зеленые зоны в этом классе почти не встречаются. Класс принимает значения индекса от 0,347 до 0,502.

Благополучный класс является лидером по показателям доли площади «ядерных» участков, обеспеченности зелеными зонами, доле озелененных водоохраных зон. В нем отсутствуют туннелированные реки, слабо расчленены зеленые зоны. Он принимает значения выше 0,503.

Пространственное распределение индекса имеет выраженную функциональную и морфологическую обусловленность. Территории с уязвимым классом располагаются по наиболее населенным частям побережий. С точки зрения морфометрической привязки уязвимые территории преимущественно находятся на прибрежных морских равнинах и нижних склоновых поверхностях. Благополучные территории располагаются преимущественно в малонаселенных центральных частях полуострова, о. Русский и о. Попова. С точки зрения рельефной привязки они располагаются на нижних склоновых поверхностях и средних склоновых поверхностях. В табл. 6 приведено сравнение типа рельефа и среднего значения индекса в его пределах.

Таблица 6. Среднее значение индекса по формам рельефа

Форма рельефа	Среднее значение индекса
Прибрежные морские равнины	0,198
Нижние склоновые поверхности	0,321
Средние склоновые поверхности	0,360
Низкогорные вершинные поверхности	0,313

Источник: составлено В.А. Дмитриевым.

Полученные показатели указывают на основной паттерн морфологического развития города — дефицит пространств, благоприятных для строительства, вынуждает использовать большую часть доступных земель. В свою очередь, неудобья, включая склоны и вершинные поверхности, остаются незастроенными.

Анализ различий индекса в контексте привязки к функциональному зонированию территории г.о. Владивосток согласно Генеральному плану<sup>7</sup> показал отсутствие существенных различий между индексами в пределах общественно-деловых и жилых зон и зон застройки индивидуальными домами. Различия, включая присвоение умеренно уязвимого, наблюдались в пределах садоводческих хозяйств. Наибольшую роль повышения значения индекса в пределах жилых, смешанных и деловых зон играли озелененные склоны, неудобья, кладбища.

Для рекреационных зон и зоны лесов было выявлено различие. Рекреационные зоны приурочены преимущественно к территориям умеренно благоприятным, в то время как лесные зоны — к благоприятным. Данные территории возможно рассматривать как резервы для дальнейшего роста города.

Анализ распределения 1-го квартиля индекса показал, что наименьшие значения индекса концентрируются в пределах центральных районов города — полуострова Шкота, прилегающих частях центра. Также низкие значения фиксировались у побережий, в районе кампуса на о. Русский.

<sup>7</sup> Документы территориального планирования // Владивосток : официальный сайт администрации. URL: <https://www.vlc.ru/city-environment/gradostroitelstvo-/architecture-vlc/architecture-general-plan/?ysclid=mnofazn9f543358669> (дата обращения: 26.01.2026).

## Заключение

Разработанный интегральный индекс структурных показателей города дал количественную оценку устойчивости водно-зеленой инфраструктуры Владивостока и показал ярко выраженную пространственную неоднородность. Доля территорий с низкими значениями индекса составляет 61,1 %, преимущественно в районах плотной застройки и транспортных коридоров.

Сформирован перечень уязвимых участков и резервных территорий для усиления экологического каркаса. Практически данные материалы пригодны для корректировки документов территориального планирования поселения. Разработанный подход воспроизводим в других горных городах при калибровке порогов MSPA и весов CRITIC под местные данные. Ограничения связаны с погрешностями исходных слоев, выбором порогов бинаризации и параметров доступности, их учет позволяет трактовать оценки как консервативные.

## Список литературы

- [1] *Borsdorf A., Haller A.* Chapter 9: Urban Montology: mountain cities as transdisciplinary research focus / *The Elgar Companion to Geography, Transdisciplinarity and Sustainability* / ed. by F.O. Sarmiento, L.M. Frolich // *Social and Political Science*. 2020. P. 140–154. <https://doi.org/10.4337/9781786430106.00016>
- [2] *Karagulle D., Frye Ch., Sayre R., Sean P. Breyer, Aniello P., Vaughan R., Wright D.J.* Modeling global Hammond landform regions from 250-m elevation data // *Transactions in GIS*. 2017. Vol. 21. No. 5. P. 1040–1060.
- [3] *Sayre R., Frye Ch., Karagulle D., Krauer J., Breyer S., Aniello P., Wright D.J., Payne D., Adler C., Warner H., Van Sistine D.P., Cress J.* A New High-Resolution Map of World Mountains and an Online Tool for Visualizing and Comparing Characterizations of Global Mountain Distributions // *Mountain Research and Development*. 2018. Vol. 38. No. 3. P. 240–249. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00107.1>
- [4] Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 3 : Зелёная инфраструктура и экосистемные услуги крупнейших городов России / под ред. О.А. Климанова. Москва : Изд-во Центра охраны дикой природы, 2021. 112 с. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/381066686/> (дата обращения: 26.01.2026).
- [5] *Климанова О.А., Колбоевский Е.Ю., Илларионова О.А.* Зелёная инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2020.
- [6] *Gentili R., Quaglini L.A., Galasso G., Montagnani Ch., Caronni S., Cardarelli E., Citterio S.* Urban refugia sheltering biodiversity across world cities // *Urban Ecosystems*. 2024. 27. P. 219–230. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01432-x>
- [7] Huang H. Fu D., Ding G., Yan C., Xie X., Gao Ya., Liu Q. Construction and optimization of Green Infrastructure Network in mountainous cities: a case study of Fuzhou, China // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article no. 11936. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57567-0> EDN: FWIJWZ
- [8] *Song S., Wang S., Xu D., Gong Ye.* Elemental evolution characteristics and influencing factors of green infrastructure network in karst mountain cities: a case study of Qianzhong urban agglomeration in Southwest China // *Ecological Processes*. 2024. 13. Article no. 54. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00530-8> EDN: MXVVDG

- [9] Wu X., Zhang J., Geng X., Wang T., Wang K., Liu Sh. Increasing green infrastructure-based ecological resilience in urban systems: a perspective from locating ecological and disturbance sources in a resource-based city // *Sustainable Cities and Society*. 2020. 61. Article no. 102354 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102354> EDN: MNHLUR
- [10] Illarionova O., Klimanova O., Dmitrieva I. Urban river zones in blue-green infrastructure: assessing functionality and efficiency in Novosibirsk // *Green Infrastructure and Climate Resilience*. Springer Geography. Springer, Cham, 2025. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95796-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95796-3_13)
- [11] Hamel P., Tan L. Blue-green infrastructure for flood and water quality management in Southeast Asia: evidence and knowledge gaps // *Environmental Management*. 2022. Vol. 69. P. 699–718. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01467-w> EDN: DRCHMU
- [12] Ncube S., Arthur S. Influence of blue-green and grey infrastructure combinations on natural and human-derived capital in urban drainage planning // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 5. Article no. 2571. <https://doi.org/10.3390/su13052571> EDN: EPGFHO
- [13] Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. Vol. 342. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693> EDN: SOHMPX
- [14] Meerow S., Newell J. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 159. P. 62–75.
- [15] Колбовский Е.Ю. Пространственный анализ в геоэкологии. Москва : МГУ, 2022. 820 с.
- [16] Zvyagina N., Potytkin D. Ecological urbanism: physiological effects of visual perception of modern architecture of cities // 17th International Multidisciplinary Scientific Geo-conference SGEM 2017. 2017. P. 577–584. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/62> EDN: HDPNTP
- [17] Alinezhad A., Khalili J. CRITIC Method // *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)* // *International Series in Operations Research & Management Science*. Vol. 277. Springer, Cham, 2019. P. 199–203. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9_26)

### Сведения об авторах:

Кучер Дмитрий Евгеньевич, доцент, кандидат технических наук, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6 ORCID: 0000-0002-7919-3487; eLIBRARY SPIN-код: 5048-2782. E-mail: kucher-de@rudn.ru

Дмитриев Владимир Александрович, аспирант, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0009-0009-9544-8345; eLIBRARY SPIN-код: 8899-1400. E-mail: dmitrieff200@yandex.ru