

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



РОССИЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ

3/2023





Учредитель

Академия наук Республики Татарстан

Издатель

Институт проблем экологии и недропользования
АН РТ

Главный редактор

Р.Р. Шагидуллин

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

Заместители главного редактора

В.З. Латыпова

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

Д.В. Иванов

к.б.н., заместитель директора по научной работе
Института проблем экологии и недропользования
АН РТ

Редакция

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

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

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

Журнал включен в систему Российского индекса
научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Адрес редакции:

420087 г. Казань, ул. Даурская, 28
Тел./факс: +7 (843) 275-96-95

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

Редакционная коллегия

В.И. Бармин – д.г.н., профессор, декан геолого-геогра-
фического факультета, заведующий кафедрой экологии,
природопользования, землеустройства и БЖД Астра-
ханского государственного университета

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

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

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

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

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

А.А. Лукин – д.б.н., профессор, начальник Федераль-
ного селекционно-генетического центра рыбоводства
филиала ФГБУ «Главное бассейновое управление по
рыболовству и сохранению водных биологических ре-
сурсов»

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

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

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

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

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

В.И. Сафарова – д.х.н., профессор, начальник управ-
ления государственного аналитического контроля Ми-
нистерства природопользования и экологии Республики
Башкортостан, профессор кафедры безопасности про-
изводства и промышленной экологии Уфимского госу-
дарственного авиационного университета

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

А.М. Смирнов – д.б.н., академик РАН, научный руко-
водитель Всероссийского научно-исследовательского ин-
ститута ветеринарной санитарии, гигиены и экологии;
Т.Х. Спаркс – PhD, профессор, Институт зоологии По-
знаньского университета естественных наук (Польша);
Музей зоологии Кембриджского университета (Велико-
британия)

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

Ответственность за содержание статей несут авторы.

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

Founder

Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan

Publisher

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

Chief Editor

R.R. Shagidullin

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

Deputy Chief Editors

V. Z. Latypova

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

D.V. Ivanov

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

Executive secretary

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

Designer: A.Yu. Borodovskaya

Cover photo: A.H. Lylova

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

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

Frequency: 4 issues per year

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

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

Editorial address

28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia
Phone: +7 (843) 275-96-95

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

Editorial board

A.N. Barmin – Doctor in Geography, Professor, Dean of Geological and Geographical Faculty, Head of the Department of Ecology, Nature Management, Land Management and Life Safety, Astrakhan State University

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

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

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

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

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

A.A. Lukin – Doctor in Biology, Professor, Head of the Federal Selection Genetic and Fish Farming Center, Branch of «Main Basin Administration for Fishing State and Conservation of Aquatic Biological Resources»

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

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

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

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

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

V.I. Safarova – Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Department of State Analytical Control, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Bashkortostan; Professor of the Department of Production Safety and Industrial Ecology, Ufa State Aviation University

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

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

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

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

The authors are responsible for the content of the articles.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Экология природных систем

Т.Л. Ананина, А.А. Савельев, Р.Р. Шагидуллин, Т.А. Гордиенко, Р.А. Суходольская
Климатические факторы могут по-разному влиять на размер тела у близкородственных видов (на примере жуков-жужелиц) 4

А.О. Аськеев, И.В. Аськеев, С.П. Монахов, О.В. Аськеев
Население рыб малых рек крайнего востока Европы в градиентах окружающей среды 12

Г.И. Ложкин, Н.А. Чижикова, Д.В. Тишин, Э.И. Насырова
Региональные кривые роста сосны обыкновенной в местообитаниях разной увлажненности 22

Геоэкология

А.П. Гусев
Тренды продуктивности сельскохозяйственных и лесных ландшафтов Белорусского Полесья в 2000–2022 гг. (по данным съемки сенсора MODIS спутника Terra) 28

И.И. Зиганшин, Д.В. Иванов, Р.Р. Хасанов, А.Б. Александрова
Мониторинг морфометрических характеристик особо охраняемых озер Предволжья Республики Татарстан 34

Экологическая безопасность

Р.А. Шагидуллина, О.В. Никитин, Р.Н. Сабанаев, В.З. Латыпова
Анализ современных требований природоохранного и водного законодательства по регулированию поступления поверхностного стока в водные объекты 42

Р.А. Шагидуллина, А.Р. Шагидуллин, В.А. Нурмехамитова, А.А. Мусина, А.Ф. Гилязова, Р.Р. Шагидуллин
Предложения по повышению эффективности работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в Республике Татарстан 49

А.С. Петухов, Т.А. Кремлева, Г.А. Петухова, Н.А. Хритохин
Биохимическая ответная реакция березы повислой (*Betula pendula*) на накопление тяжелых металлов в городской среде 56

Правила для авторов 65

CONTENTS

Ecology of natural systems

Ananina T.L., Saveliev A.A., Shagidullin R.R., Gordienko T.A., Sukhodolskaya R.A.
Climatic factors can differently affect body size in closely related species (the case study in ground beetles) 4

Askeyev A.O., Askeyev I.V., Monakhov S.P., Askeyev O.V.
Fish assemblages of small rivers in the east edge of Europe in environmental gradients 12

Lozhkin G.V., Chizhikova N.A., Tishin D.V., Nasyrova E.I.
Regional growth curves of *Pinus sylvestris* L. in habitats of different humidity 22

Geocology

Gusev A.P.
Productivity trends of agricultural and forest landscape in Belarussian Polesia in 2000–2022 (according to the MODIS Terra Data) 28

Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Alexandrova A.B.
Monitoring of morphometric characteristics of specially protected lakes in the Pre-Volga region of the Republic of Tatarstan 34

Ecological safety

Shagidullina R.A., Nikitin O.V., Sabanaev R.N., Latypova V.Z.
Analysis of modern requirements of environmental and water legislation to regulate the flow of surface runoff into water bodies 42

Shagidullina R.A., Shagidullin A.R., Nurmehamitova V.A., Ibragimova A.A., Gilyazova A.F., Shagidullin R.R.
Proposals for improving the efficiency of air pollution monitoring in the Republic of Tatarstan 49

Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Kritokhin N.A.
Biochemical response of silver birch (*Betula pendula*) to heavy metal accumulation in the urban environment 56

Правила для авторов 65

¹T.L. Ananina, ²A.A. Saveliev, ³R.R. Shagidullin,
³T.A. Gordienko, ³R.A. Sukhodolskaya

¹Zapovednoe Podlemorie, ²Kazan (Volga Region) Federal University

³Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences,
sukhodolskayaraisa@gmail.com

CLIMATIC FACTORS CAN DIFFERENTLY AFFECT BODY SIZE IN CLOSELY RELATED SPECIES (THE CASE STUDY IN GROUND BEETLES)

The study of body size variation in the altitudinal gradient showed the presence of shifts in the morphometric characteristics of ground beetle populations under the influence of bioclimatic factors. Ground beetles were collected on the Barguzinsky Ridge (Russia, Buryatia) in eight characteristic biotopes in four high-altitude sections: on the coast of Lake Baikal, low, middle and high mountains (458–1667 m above sea level). At each site in 2004–2017, we carried out a quantitative account of ground beetles and recorded the main climatic parameters using thermochrons, sedimentary cylinders, soil thermometers, and a snow gauge. We took two common species – *Carabus odoratus* and *Pterostichus montanus* (2200 specimens) for morphometric analysis. The six features of the body organs – the length and width of the elytra, the length and width of the pronotum, and the length of the head and distance between the eyes were measured. Using linear modeling, we investigated how climatic variables affected body size in the studied species. Comparing the reaction of the two species to hydroclimatic parameters, we noted that the reaction was directly opposite to temperature indicators, and the similar to factors that depend on humidity. The higher was the soil temperature at a 5 cm depth, the greater was the length of the elytra, pronotum, and head in *C. odoratus*, but the same characters were smaller in *P. montanus*. High population density led to body size decrease in *C. odoratus*, but *P. montanus* responded in lesser degree. By genus, *C. odoratus* turned out to be more sensitive to changes in bioclimatic factors.

Keywords: ground beetles; body size variation; climatic factors; number, mountains.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.04.11>

Introduction

The causes of morphological variation of organisms along climatic gradients are the main historical and present challenges of ecology (Hodkinson, 2005). Different patterns or theories discuss body size as the most studied trait in a wide variety of organisms and along different geographic thermic gradients. The most known is the “Bergmann rule” which states that larger size is often achieved in colder climates than in warmer ones, which is linked to the temperature budget of these animals. Bergmann (Bergmann, 1848) proposed that larger animals are better enabled to conserve heat in colder climates. Bergmann’s patterns in ectotherms has yielded highly heterogeneous results. Some studies conform Bergmann’s rule, but others show other patterns, including positive relationships between body size and temperature (converse Bergmann’s rule), or no relationship at all (Shelomi, 2012; Vinarski, 2014).

The comparison of morphological features of organisms has been a central element of biology for centuries (Adams et al., 2004). There are numerous

investigations dealing with morphological traits of carabids and their life strategies among different habitats (Braun et al., 2004; Gutiérrez, Menéndez, 1997; Magura et al., 2006; Niemelä et al., 2002; Ribera et al., 2001; Szyszko et al., 2000; Weller, Ganzhorn, 2004). But there are no investigations, concerning climatic factors impact on their body size variation. Few studies dealt with insects in a whole and suggested that climate warming would lead to body size decrease, especially in terrestrial taxa (Colinet et al., 2015; Verberk et al., 2021). Temporal decrease in size was already revealed in Scarabeidae species (Maher, Shelomi, 2022). As for carabids Szyszko et al. (2000) suggested the «mean individual biomass» (MIB) as an indicator of the state of succession in the environment.

Without diminishing the importance of this approach, it should nevertheless be emphasized that all microevolutionary processes take place on the population level. So intra-specific measuring should be processed to analyze drivers of body size variation in organisms. As for ground beetles

the majority of studies, as mentioned above, were done exactly on assemblages level. But studies on population level is notable. Their body size varied in geographical and anthropogenic impact gradients (Sukhodolskaya, Ereemeeva, 2013; Sukhodolskaya, 2014; Sukhodolskaya, Ananina, 2015). Modeling procedures also confirmed habitats vegetation cover effect on beetles size variation (Sukhodolskaya, Saveliev, 2016, 2017). Significant part of them concerns altitude variation in size (Ananina et al., 2020; Sukhodolskaya et al., 2021a): beetles size varied in elevation gradient declining in some species towards high mountains. Undoubtedly, severity of environmental conditions at high altitudes leads to such the consequences. Despite the absolute logic of those statements, none of those authors studied the specific climatic factors that might influence beetles body size. It has been done in relation to other species. Modeling climatic factors impact on ground beetle *Pterostichus melanarius* Ill. along its area and using BIOCLIM data base showed that temperature related factors mostly reduced beetles traits values, but precipitation related factors – enlarged them (Luzyanin et al., 2022). Mentioned paper dealt with generalist species distributed all over Eurasia. In mountain ecosystem, such the investigations did not take place. However, elevation changes in species traits, as the response to environmental factors effect in altitude gradient, reflect possible changes in population structure as the response to global climate changes. Besides, the problem of Sexual Size Dimorphism (SSD) exists. Females and males sometimes showed different patterns in body size variation in geographical gradients (Ananina et al., 2020; Sukhodolskaya et al., 2021b).

Wishing to fill this gap, we aimed our study to model bioclimatic factors impact on body size variation in two mountain ground beetle species – *Carabus odoratus* Shil. and *Pterostichus montanus* Motsch. Beetles imagoes size mainly is affected by temperature and humidity of soil where their larvae grow. Then we hypothesized that: (a) beetles body size would correlate with annual temperatures; (b) beetles body size would correlate with soil mean humidity; (c) beetle body size would negatively correlate with population density; (d) response of species studied would vary due to the differences in their life-histories.

Materials and methods

Studied species

Two species of ground beetles were chosen as models (fig. 1).

C. odoratus barguzinicus is the Baikal subspecies of *C. odoratus*. It is distributed from the Yamal



A



B

Fig. 1. Images of the studied species:
A – *C. odoratus barguzinicus* Shil., 1996;
photo by T.L. Ananina

B – *P. (Pterophilus) montanus* Motschulsky, 1844
(*Carabidae of the world*, 2017)

Peninsula and all-around Siberia to the Magadan area and the Kamchatka Peninsula. The species has a large number of subspecies and local forms. In Siberia and north of the Russian Far East, the species is represented by 20 subspecies (Obydov, 2006). *C. odoratus barguzinicus* is endemic, and generalist in Barguzin Ridge (18.4% of the total population) (Shilenkov, 1996), an eurytopic species with mountain-forest features, early summer species by type of reproduction, recycling. Previous studies of carabid beetles at high altitudes have demonstrated the prolonged adult life cycles (more than one or two years) because the annual length of the growing season is too short (Sharova, Dushenkov, 1979; Sharova, Khobrakova, 2005). The species lives in all altitude zones from the Lake Baikal shore to the high mountains.

P. montanus is another boreal Eastern Palaearctic species distributed from the Ural to the Far East and northern Mongolia (Sharova, Dushenkov, 1979), generalist ground beetle species (19.7% of the total population). In adjacent territories the species lives exclusively in the mountains. In the conditions of the Barguzin Ridge, the species descends to the coast of Baikal. Therefore, the *P. montanus* is eurytopic mountain-forest species and belongs to the ecological group "lowered alpine" (Sharova, Khobrakova, 2005). It has one-year life cycle, early summer-spring type of reproduction, monocyclic (Ananina, 2020).

Study sites

The studied territories are located in the Southern Siberian Mountain. The key plot of entomological research is located at Barguzin State Natural Biosphere Reserve, S = 375 thousand hectares (N 54°20'; E 109°30'; Republic of Buryatia, Russia) on the western macroslope of the same name Ridge. It is on the northeastern coast of Lake Baikal.

The study area is a part of the Baikal-Dzhugdzhur mountain-taiga region of North Asia. The climate is sharply continental, with marine features. Average long-term annual air temperatures are -2.7°C . The coldest months of the year are January (-22.7°C) and February (-21.4°C). The warmest months of the year are July (12.9°C) and August (13.5°C). The average annual level of atmospheric precipitation is 421 mm (in the warm period of the year – 251 mm, in the cold period of the year – 170 mm).

The area has frosty long winters and cool short summers. The continentality decreases during the transitional seasons of the year: in spring, Baikal cools the air, and in autumn, it gives heat off. Here, the development of a special wet Baikal type of zonation associated with the inversion phenomenon is noted. Thus, on the shores of Lake Baikal, a pseudo subalpine belt formed (larch forests and clumps of dwarf cedar). The latter does not rise above 100 m above the lake level (Tyulina, 1967). Eight entomological sites were located in experimental biotopes along a 30-km high-altitude transect in the Davsha river valley, from the coast of Lake Baikal to the subalpine belt. The altitude sections: coast, 458–500 m above sea level; low mountains (the lower part of the mountain forest belt, 501–720 m); middle mountains (the upper part of the mountain-forest belt, 721–1004 m), and high mountains (subalpine vegetation belt, 1005–1667 m). In the coastal transect part we investigated beetles in Blueberry cedar and Herbaceous birch forest; in the low mountains – Blueberry larch and *Bergenia* cedar; in the middle mountains – *Bergenia* aspen

and Blueberry fir; in the high mountains – Blueberry tundra and Lichen tundra biotopes (tab. 1).

At each plot we recorded climatic parameters. Their list and mean annual values are presented in table 2.

Ground beetle sampling

We used pitfall traps for beetles sampling – glass jars with of 70 mm in diameter and 0.5 liters in volume, with 4% formalin as a fixative. Pitfall traps were placed in a straight line at 5 m interval. We selected captured insects every decade (every 10 days) from the third decade of May to the second decade of September in 2004 – 2017. In each biotope, during the study period, we worked out 1708 trap-days on the coast, 1400 trap-days in the low-mountain belt, and 1260 trap-days in the middle and high mountains. In total, 45673 ground beetles were caught.

We selected undamaged specimens for analysis, but without fixing the selection time (year, month, and decade). In total 2200 specimen of *C. odoratus* and *P. montanus* were selected and measured individually for six traits: elytra length (distance between posterior end of scutellum and terminus of right elytron, in the case of absence of intact right elytron, left one is acceptable) and width (distance between anterior-distal corners of elytra), pronotum length (measured along of central furrow) and width (distance between posterior corners of the pronotum), head length (distance between labrum and juncture of occiput and postgena) and distance between eyes in each beetle.

Statistical analysis

Table 1. Characteristics and location of studied biotopes on the altitudinal transect in the Barguzin Ridge

№	Biotope name	Main forest-forming species	Land cover	Hight, abs. m	Coordinates
1	Blueberry cedar	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	460	54.36 N 109.49 E
2	Herbaceous birch	<i>Betula baikalensis</i> Suk.	<i>Pyrola incarnata</i> (DC.), <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> (L.)	485	54.358 N 109.50 E
3	Blueberry larch	<i>Larix sibirica</i> Ledeb.	<i>Vaccinium uliginosum</i> L.	518	54.21 N 109.30 E
4	<i>Bergenia</i> cedar	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.,	635	54.46 N 109.85 E
5	<i>Bergenia</i> aspen	<i>Populus tremula</i> L.	<i>Bergenia crassifolia</i> L.	712	54.23 N 109.43 E
6	Blueberry fir	<i>Abies sibirica</i> Led.	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	1278	54.39 N 109.69 E
7	Blueberry tundra	<i>Pinus pumila</i> Pall.	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	1637	54.34 N 109.83 E
8	Lichen tundra	<i>Rhododendron aureum</i> G.	<i>Cladonia rangiferina</i> L.	1701	54.34 N 109.83 E

Table 2. Climatic parameters and abundance of species studied

Factors/Biotopes	Blueberry cedar	Herbaceous birch	Blueberry larch	Bergenia cedar	Bergenia aspen	Blueberry fir	Blueberry tundra	Lihen tundra
Soil temp., depth 5 cm, °C	12.1	14.5	12.3	11	11.2	9.5	10.4	7.9
Soil temp., depth 10 cm, °C	11.9	13.7	11.3	10.5	10.7	7.8	10	7.5
Min soil temp., °C	4.1	5.3	3.3	4.5	8.2	-	4.3	3.9
Precipitation, mm	153	153	200	178	178	252	-	453
Beginning $t > 0^{\circ}\text{C}$, months-decades	V-3	V-3	V-1	V-2	V-2	VI-1	VI-3	VI-3
Snow cover thickness, cm	42	42	43	58	76	138	167	167
Snow cover duration, days	171	171	180	180	230	230	245	245
Frost-free period, days	123	123	140	140	135	135	113	113
Min temperature in July, °C	8.8	8.8	10	10.5	10.5	9.5	8.7	8
Min temperature in January, °C	-31.4	-12.5	-12.9	-11.5	-5.8	-1.7	-1.7	-1.6
<i>P. montanus</i> abundance, ind. 100 trap/day	8	10.5	11.9	27.8	19.3	22.6	5.3	5.6
<i>C. odoratus</i> abundance, ind. 100 trap/day	1.3	2.1	14.8	15.9	16.7	17.3	18.5	19.3

We used linear models to evaluate environmental factors impact on beetles' body size variation. Independent variables: soil humidity, soil temperature at 5 and 10 cm depth, minimal temperatures at the soil surface, precipitation level, the date of positive temperatures of soil, population number, snow depth, frost-free period, snowpack, minimal soil temperatures in July and January.

We processed data in R using linear models (R Development Core Team, 2021). The latter permitted us to conclude what environmental factor affected beetles size and led to the different responses in males and females.

$$Size_{i,j,k} = a_{i,0} + a_{i,1} \cdot I_{i,j,k}^{male} + a_{i,2} \cdot X_{i,j,k} + a_{i,3} \cdot I_{i,j,k}^{male} \cdot X_{i,j,k} + \varepsilon_{i,j,k}$$

$$\varepsilon_{i,j,k} \sim \text{Norm}(0, \sigma_{i,j}^2)$$

a_{i1} —the difference between the average size of females and males in a whole by all data set;

a_{i2} —the value of shift in female trait size under the certain environmental factor impact; if it was

positive, the factor increased female's trait size, if it was negative – the factor decreased females size;

a_{i3} – the difference in response to the certain climatic factor in males compared with of females and its significance; in other words, a_{i3} told that the shifts in traits differed in males and females in value (or SSD was recorded).

Results

Results of bioclimatic factors impact on beetles' body size variation are presented in Table 3.

Comparing two species response to the climatic factors, we noted that response was exactly the opposite. We have studied 72 cases (12 factors multiplied by 6 traits) and in 52 cases (72%) the response discussed was the opposite. If we differentiate climatic factors according to their nature, the result was as follows. Temperature-depended factors in 81% of cases influenced *C. odoratus* and *P. montanus* in different directions. For instance, the higher was soil temperature at the 5 cm depth the longer were

Table 3. Directions of shifts in traits value under climatic factors impact in studies species

Factors/Traits	Elytra length		Elytra width		Pronotum length		Pronotum width		Head length		Distance between eyes	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Species												
Soil humidity	↓	o	↓	↑	↓	↓	↓	↓	o	↓	↓	↓
Soil t, 5 cm	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓
Soil t, 10 cm	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	o	↑	↓	↑	↓
Min soil t	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	o	↑	↓	↑	↓
Precipitation level	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Positive t date	↓	o	↓	↑	↓	↓	↓	o	↓	↓	↓	↓
Abundance	↓	↓	o	o	↓	↓	↓	o	o	o	↓	↓
Snow cover thickness	↓	o	↓	o	↓	o	↓	o	↓	o	↓	↓
Snow cover duration	↓	o	↓	↑	↓	o	↓	o	↓	↑	↓	o
Frost-free period	↓	↑	↓	↑	↓	o	↓	o	↓	↑	↓	↑
Minimal t in July	↓	↑	↓	↑	↓	o	↓	o	↑	↓	↓	o
Minimal t in January	↓	↑	↓	↑	↓	o	↓	o	↑	↓	↓	↓

Notes: 1 – *C. odoratus*, 2 – *P. montanus*, ↑ – positive correlation, ↓ – negative correlation, o – no correlation; arrows colour: yellow – males changed in the same direction with females, but to a lesser degree than females; green – males changed in the same direction with females, but to a greater degree than females; red – males changed in an opposite direction compared with females

elytra length in *C. odoratus*, but the shorter were in *P. montanus* etc.

Similarly snow-dependent factors acted, and the only in one case (impact of snow cover thickness on the trait «distance between eyes») the response of both species was similar. Humidity-dependent factors influenced both species in the same way and in the only 33% of cases the response of species trait was the opposite.

We could not conclude that different traits reaction on climatic factors was specific: elytra parameters as well as pronotum and head ones responded just about similarly in both species.

Population density affected beetles size more often in *C. odoratus*, decreasing traits size. Therefore, that species was more sensitive for environmental factors variation.

Sexual Size Dimorphism appeared more frequently in *P. montanus*. Among 72 cases studied SSD in *C. odoratus* was observed only in eight cases and in all of them direction of traits shifts were similar in both sexes. In *P. montanus* we observed 10 cases with multidirectional changes in males and females among 15 registered. So *P. montanus* seemed to be more labile under the climatic factors impact. What factors lead to SSD appearance? In relation to temperature-dependent factors, we had 36 cases for analysis. Among them 15 ones (42%) with SSD result. The latter appeared quantitatively similarly in *C. odoratus* and *P. montanus*. Humidity-dependent factors only in 33% of cases studied lead to SSD and snow-dependent factors lead to SSD only in one case (5%). Therefore, we concluded that temperature was the main factor that increased traits variation and consequently led to SSD appearance.

Discussion

Body size at *C. odoratus* and *P. montanus* varied differently in altitude gradient. *C. odoratus* traits decreased monotonically (Ananina et al., 2020). *P. montanus* had saw-tooth curve of body size variation with regression coefficient about zero. In other words, *P. montanus* size did not change in elevational gradient (Sukhodolskaya et al., 2021a).

Preliminary results in bioclimatic factors impact on beetles' body size were published in some conference papers (Sukhodolskaya et al., 2022a, b).

Humidity-dependent factors (humidity, precipitation) level affected *C. odoratus* negatively: the higher was those factors value the smaller was beetles size. Temperature-dependent factors, on the contrary, positively influenced beetles size: the higher was soil temperature at depth of 5 and 10 cm the larger were the beetles (Sukhodolskaya et al., 2022a). For *P. montanus* the results were somewhat different. Beetles size decreased with decreasing temperature at the 10 cm depth and minimal temperature of the soil, but it decreased with the precipitation increasing and late dates of positive temperatures at the surface (Sukhodolskaya et al., 2022b). Positive effect on beetles' size had snow cover depth, frost-free period duration, and minimal temperatures of the soil surface in July and under snow in January.

Our study with comparative analysis in two species body size variation showed that studied species response to bioclimatic factors was directly opposite in the majority of cases. SSD in response to climatic factors emerged in them differently also.

Thus, those two species demonstrated two different life strategies: different ways of body size variation in altitude gradient and different response to climatic factors as well. SSD was more pronounced in *P. montanus*. It is believed that SSD is more pronounced in severe environment (Geodakyan, 1991). Extreme weather events such as heat waves are predicting to increase in the course of global climate change. Widespread species are exposing to a variety of environmental conditions throughout their distribution range, often resulting in local adaptation (Günter et al., 2020). The latter authors working with butterfly *Pieris napi* showed 'pace-of-life' syndrome

when northern populations had a slower life style and invested more strongly into maintenance, while those from warmer regions showed the opposite pattern. In our case, populations from different elevations could also vary in their capacity to deal with challenging conditions such as thermal stress. *C. odoratus* и *P. montanus* habitate similar biotopes at Barguzin Ridge. They are generalists, and have colonized all altitude belts. Both are mountain – forest species (Sharova, Dushenkov, 1979). Nevertheless, they differ significantly in life-style histories, namely specific ways of adaptation (Chernov, 2008) to Barguzin Ridge environment (Matalin, 2007). *C. odoratus* has 2 or 3-year cycle with delayed development during several seasons. Both imagoes and larvae hibernate. *P. montanus* has strict life cycle: it finishes development in a single season and only imagoes hibernate.

The above features determine the cyclicity of reproduction: *C. odoratus* is the polycyclic and *P. montanus* is the monocyclic. Species differ in reproduction phenology also. *C. odoratus* comes to the surface at the second or third decades of June, it is middle-summer species. *P. montanus* imagoes comes to the soil surface in the third decade of May, it is early-summer species. *C. odoratus* is «walking epigeont», it dwells on the soil surface. *P. monatus* lives in litter. They differ in body sizes also, *C. odoratus* being larger than *P. montanus*. All above-mentioned characters allow us to suggest that the ways of adaptation to environment are different in two studied species. We consider *C. odoratus* to have inert type of adaptation. It adaptively acclimatizes to the short vegetation season. The latter allows it to habitat open biotopes in high mountains. *P. montanus* conceivably has active adaptation, striving to complete life cycle in a single season. Its refuge is a thick layer of litter, which is more common in low mountains. Therefore, adaptation to climatic factors appeared to be genera-specific. Natural environmental factors (e.g., climate and elevation) often jointly affect species. It is important to identify the real effects of individual factors for understanding the environmental process. Our field experiment was controlled as we took instrument readings systematically at our plots and then modeled factors impact on beetles size. Elevational gradients are closely associated with abiotic factors at small spatial scales and is an instrument to reveal species' adjustments to climatic and other environmental factors. Genera-specific response to them shown in our work seems to be not altitude-dependent. Perhaps other factors, not included into the study design, were responsible to such results. Similar propositions the other author made when working with dark bush-

crickets (Jarčuška et al., 2023). Environmentally-induced plasticity can be explained by resource-based habitat concept or the plants richness at the habitats (Schuldt et al., 2019; Hansen et al., 2023).

Funding: The study was carried out within the framework of State Assignment on the topic 730000P.16.1.OH17AA33000 «Investigations in East Europe Diversity in Conditions of Nature-Climatic and Anthropogen Impact in Historical and Modern Contexts»

Acknowledgments: We are grateful to the administration of «Zapovednoe Podlemorie» for our expeditions processing.

References

1. Adams D.C., Rohlf F.J., Slice D.E. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution' // Italian journal of zoology. 2004. 71(1). P. 5–16. <https://doi.org/10.1080/11250000409356545>.
2. Ananina T.L. Results of Long-Term Monitoring of the Genus *Carabus* (Coleoptera: Carabidae) in the Barguzinsky Range (Northern Baikal Region) // Contemporary Problems of Ecology. 2020. 13(4). P. 391–400 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1995425520040046>.
3. Ananina T., Sukhodolskaya R., Saveliyev A. Altitudinal variation of sexual size dimorphism in ground beetle *Carabus odoratus* Shill. // GSC Biological and Pharmaceutical Sciences. 2020. 12(2). P. 27–36. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2020.12.2.0216>.
4. Bergmann C. Über die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Thiere zu ihrer Grösse. 1848. 125 p.
5. Braun S.D., Jones T.H., Perner J. Shifting average body size during regeneration after pollution – a case study using ground beetle assemblages // Ecological entomology. 2004. 29(5). P. 543–554. <https://doi.org/10.1111/j.0307-6946.2004.00643.x>.
6. Carabidae of the World. <http://www.carabidae.org> (accessed 12.08.2023).
7. Chernov Y.I. Ecology and biogeography: selected studies. Moscow: KMK, 2008. 580 p. (in Russian)
8. Colinet H., Sinclair B.J., Vernon P., Renault D. Insects in fluctuating thermal environment // Annual review of entomology. 2015. 60. P. 123–140.
9. Geodakyan V.A. Evolutionary theory of sex // Priroda. 1991. №8. P. 9–60. (in Russian)
10. Günter F., Beaulieu M., Franke K., Toshkova N., Fischer K. Clinal variation in investment into reproduction versus maintenance suggests a 'pace-of-life' syndrome in a widespread butterfly. *Oecologia*. 2020. 193(4). P. 1011–1020. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04719-4>.
11. Gutiérrez D., Menéndez R. Patterns in the distribution, abundance and body size of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) in relation to dispersal ability // Journal of biogeography. 1997. 24(6). P. 903–914.
12. Hansen R.R., Damgaard R.F., Kjær C., Rasksen M.B., Thomsen P.F., Strandberg M.T. Quantification of arthropod species resources using distance-based measures – Ground beetles as focal group // Ecological indicators. 2023. 147. P. 110026. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110026>.
13. Hodkinson I.D. Terrestrial insects along elevation gradients: species and community responses to altitude // Biological reviews. 2005. 80(3). P. 489–513. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006767>.

14. Jarůška B., Křištin A., Kaňuch P. Body size traits in the flightless bush-cricket are plastic rather than locally adapted along an elevational gradient // *Evolutionary ecology*. 2023. 37(3). P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10682-023-10231-x>.
15. Luzyanin S.L., Gordienko T.A., Saveliev A.A., Ukhova N.L., Vorobeva I.G., Solodovnikov I.A., Anciferov A.L., Nogovitsyna S.N., Aleksanov V.V., Teofilova, T.M., Sukhodolskaya R.A. Impact of climatic factors on sexual size dimorphism in ground beetle *Pterostichus melanarius* (Illiger, 1798) (Coleoptera, Carabidae) // *Ecologica Montenegrina*. 2022. 58. P. 1–13. <https://doi.org/10.37828/em.2022.58.1>.
16. Magura T., Tóthmérész B., Lövei G.L. Body size inequality of carabids along an urbanisation gradient // *Basic and applied ecology*. 2006. 7(5). P. 472–482. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2005.08.005>.
17. Maher I.M., Shelomi M. Increasing body sizes in *Anomala expansa expansa* (Coleoptera: Scarabaeidae) // *Populations in response to rising temperatures over time*. 2022. 51(4). P. 798–805. doi: 10.1093/ee/nvac032. PMID: 35641116.
18. Matalin A.V. Typology of life cycles of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in Western Palearctic // *Entomological review*. 2007. 87(8). P. 947–972. (in Russian) <https://doi.org/10.1134/S0013873807080027>.
19. Niemelä J., Kotze D.J., Venn S., Penev L., Stoyanov I., Spence J., Hartley D., De Oca E.M. Carabid beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) across urban-rural gradients: an international comparison // *Landscape ecology*. 2002. 17(5). P. 387–401.
20. Obydov D. A new subspecies of *Carabus* (*Morphocarabus*) *odoratus* Motschulsky, 1844 (Coleoptera, Carabidae) from Eastern Siberia // *Munis entomology & zoology*. 2006. 1(1). P. 149–154.
21. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. <http://www.R-project.org> (accessed: 20.05.2023).
22. Ribera I., Dolédec S., Downie I.S., Foster G.N. Effect of land disturbance and stress on species traits of ground beetle assemblages // *Ecology*. 2001. 82(4). P. 1112–1129. <https://doi.org/10.1890/0012-9658>.
23. Schuldt A., Ebeling A., Kunz M., Staab M., Guimarães-Steinicke M., Bachmann D., Durka W., Fichtner A., Fornoff W., Härdtle W., Hertzog L.R., Klein M., Roscher C., Schaller J. von Oheimb G. Multiple plant diversity components drive consumer communities across ecosystems // *Natural Communities*. 2019. 10(1). P. 1460.
24. Sharova I.K., Dushenkov V.M. Types of Development and Types of Seasonal Activity in Ground Beetles (Coleoptera, Carabidae) // *Fauna i ekologiya bespozvonochnykh*. M: MGPI, 1979. P. 15–25. (in Russian).
25. Sharova I.K., Khobrakova L.T. Features of the life cycles of *Pterostichus montanus* (Motschulsky, 1844) and *Carabus loschnikovi* (Fischer-Waldheim, 1822) (Coleoptera, Carabidae) in conditions of the mountain taiga belt in the Eastern Sayan // *Biology bulletin*. 2005. 32(1). P. 27–37. (in Russian)
26. Shelomi M. Where are we now? Bergmann's rule sensu lato in insects // *The American naturalist*. 2012. 180(4). P. 511–519. <https://doi.org/10.1086/667595>.
27. Shilenkov V.G. Ground Beetles of *Carabus* L. genus of Southern Siberia. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 1996. 80 p. (in Russian)
28. Sukhodolskaya R.A. Variation in body size and body shape in ground beetle *Pterostichus melanarius* Ill. (Coleoptera, Carabidae) // *Journal of agri-food and applied sciences*. 2014. 2(7). P. 196–205.
29. Sukhodolskaya R.A., Ananina T.L. Altitudinal variation in population density, body size and morphometric structure in *Carabus odoratus* Shil, 1996 (Coleoptera: Carabidae) // *Acta biologica Universitatis Daugavpiliensis*. 2015. 15(1). P. 179–190.
30. Sukhodolskaya R.A., Ereemeeva N.I. Body size and shape variation in Ground Beetle *Carabus aeruginosus* F.-W., 1822 (Coleoptera, Carabidae) // *Contemporary problems of ecology*. 2013. 6(6). P. 609–615.
31. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A. Crop impact on body size variation in carabid beetle *Poecilus cupreus* Linnaeus (Coleoptera, Carabidae) // *Ukrainska entomofaunistyka*. 2016. 3(7). P. 85–91. <https://doi.org/10.2991/isees-18.2018.3>.
32. Sukhodolskaya R.A., Saveliev A.A. Biotope vegetation role in body size variation in ground beetles (Coleoptera, Carabidae) // *Biological systems: sustainability, principles and functioning mechanisms / Materials of the V All-Russia conference*. Nizhny Tagil, 2017. P. 311–315. (in Russian)
33. Sukhodolskaya R.A., Ananina T.L., Saveliev A.A. Variation in Body Size and Sexual Size Dimorphism of Ground Beetle *Pterostichus montanus* Motsch. (Coleoptera, Carabidae) in Altitude Gradient // *Contemporary problems of ecology*. 2021a. 14(1). P. 62–70. <https://doi.org/10.1134/S199542552101008X>.
34. Sukhodolskaya R., Ananina T., Avtaeva T., Saveliev A. Sexual size dimorphism in ground beetles and its variation in altitude gradient // *Advances in medicine and biology*. 2021b. 191 p.
35. Sukhodolskaya R.A., Ananina T.L., Saveliev A.A. Impact of environmental factors on the variability of body size and sexual size dimorphism of *Carabus odoratus* Shill. (Carabidae, Coleoptera) // *Actual problems of ecology / Proceedings of the conference*. Grodno, 2022a. P. 160–161.
36. Sukhodolskaya R.A., Ananina T.L., Savelyev A.A. Influence of environmental factors on the variability of the size of ground beetles in high mountains // *Biological diversity of the Caucasus and the South of Russia / Proceedings of the XXIV international scientific conference*. Magas, Makhachkala, 2022b. P. 457–459. (in Russian)
37. Szyszko J., Vermeulen H.J.W., Klimaszewski K., Abs M., Schwerk A. Mean individual biomass (MIB) of ground beetles (Carabidae) as an indicator of the state of the environment // *Natural history and applied ecology of carabid beetles*. Sofia, Moscow: Pensoft, 2000. P. 289–294.
38. Tyulina L.N. The vegetation zones in the western and eastern coasts of Northern Baikal. *Geobotanicheskie issledovaniya na Baikale* (Geobotanical studies in the Baikal Region). Moscow, 1967. P. 3–44. (in Russian)
39. Verberk W., Atkinson D., Hoefnagel K.H., Hirst A.G., Horne C.R., Siepel H. Shrinking body sizes in response to warming: explanations for the temperature – size rule with special emphasis on the role of oxygen // *Biological reviews*. 2021. 96. P. 247–268. <https://doi.org/10.1111/brv.12653>.
40. Vinarski M.V. On the applicability of Bergmann's rule to ectotherms: the state of the art // *Biology bulletin reviews*. 2014. 4(3). P. 232–242. <https://doi.org/10.1134/S2079086414030098>.
41. Weller B., Ganzhorn J.U. Carabid beetle community composition, body size, and fluctuating asymmetry along an urban–rural gradient // *Basic and applied ecology*. 2004. 5(2). P. 193–201. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00220>.

Ананина Т.Л., Савельев А.А., Шагидуллин Р.Р., Гордиенко Т.А., Суходольская Р.А. **Климатические факторы могут по-разному влиять на размер тела у близкородственных видов (на примере жуков-жужелиц).**

Изучение изменчивости размеров тела в высотном градиенте показало наличие сдвигов в

морфометрических характеристиках популяций жуков жужелиц под влиянием биоклиматических факторов в горах. Жужелицы были собраны на Баргузинском хребте (Россия, Бурятия) в восьми характерных биотопах на четырех высотных участках: на побережье озера Байкал, в низких, средних и высоких горах (458–1667 м над уровнем моря). На каждом участке в 2004–2017 гг. проводили количественный учет жуков и регистрировали основные климатические параметры с помощью термохронов, осадочных цилиндров, почвенных термометров и снегомера. Для морфометрического анализа были взяты два вида *Carabus odoratus* и *Pterostichus montanus* (2200 экземпляров). Измеряли шесть признаков – длину и ширину надкрылий, длину и ширину переднеспинки, длину и расстояние между глазами головы. С помощью линейного моделирования исследовали, как климатические переменные влияют на размеры тела изучаемых видов. Сравнивая реакцию двух видов на гидроклиматические параметры, отметили, что на температурные показатели реакция была прямо противоположной, а на факторы, зависящие от влажности, – сходной. Например, чем выше температура почвы на глубине 5 см, тем больше длина надкрылий, переднеспинки и головы у *C. odoratus*, но те же признаки были меньше у *P. montanus* и др. Увеличение численности популяции у *C. odoratus* привело к уменьшению большего числа признаков, чем у *P. montanus*. По родовому признаку *C. odoratus* оказался более чувствительным к изменению биоклиматических факторов.

Ключевые слова: жуки-жужелицы; изменчивость размеров тела; климатические факторы; численность; горы.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 31.07.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 17.08.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 28.08.2023

Сведения об авторах

Ананина Татьяна Львовна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФБГУ «Заповедное Подлеморье», 671623, Россия, г. Усть-Баргузин, ул. Ленина, 71, E-mail: t_l_ananina@mail.ru.

Савельев Анатолий Александрович, доктор биологических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: anatoly.saveliev.aka.saa@gmail.com.

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

Гордиенко Татьяна Александровна, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: eiseniata@gmail.com.

Суходольская Раиса Анатольевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: ra5suh@rambler.ru.

Information about the authors

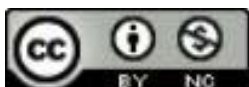
Tatyana L. Ananina, Ph.D. in Biology, Leading Researcher, FBSE «Zapovednoe Podlemorie», 71, Lenin st., Ust-Barguzin, 671623, Russia, E-mail: t_l_ananina@mail.ru

Anatoliy A. Saveliev, D.Sci. in Biology, Professor, Kazan Federal University, 5, Tovarisheskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: anatoly.saveliev.aka.saa@gmail.com.

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

Tatyana A. Gordienko, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: eiseniata@gmail.com.

Raisa A. Sukhodolskaya, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: ra5suh@rambler.ru.



А.О. Аськеев, И.В. Аськеев, С.П. Монахов, О.В. Аськеев

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, parus.cyanus@rambler.ru

НАСЕЛЕНИЕ РЫБ МАЛЫХ РЕК КРАЙНЕГО ВОСТОКА ЕВРОПЫ В ГРАДИЕНТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

На территории Республики Татарстан исследовано 318 участков малых рек, в которых было отловлено 40 видов рыб, но только усатый голец и обыкновенный пескарь были представлены более, чем в половине исследованных нами участков. Двенадцать наиболее многочисленных видов рыб: речной гольян, усатый голец, обыкновенный пескарь, уклейка, голавль, плотва, обыкновенный елец, верховка, сибирская щиповка, обыкновенная быстрянка, окунь и белоперый пескарь вместе составляли 95% от всех пойманных особей. Видовое богатство рыб и величина индекса Шеннона имеют тенденцию к увеличению на широких и глубоких участках рек, расположенных на небольших высотах над уровнем моря. Основными факторами окружающей среды, определяющими композицию отдельных видов рыб на малых реках на крайнем Востоке европейского субконтинента были: высота над уровнем моря, ширина и глубина реки.

Ключевые слова: малые реки; население рыб; факторы окружающей среды; индекс Шеннона; Республика Татарстан.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.12.21>

Введение

Малые реки в Российской Федерации, являясь самыми многочисленными водными объектами и внося огромный вклад в формирование биологического разнообразия, остаются малоизученными в ихтиологическом плане (Иванчева и др., 2008). Вместе с тем, они служат основным резерватом для сохранения многих редких и исчезающих видов рыб. В современную эпоху на ихтиофауну малых рек негативно воздействует целый ряд факторов: от различных видов антропогенной деятельности (создание водохранилищ, изменение водного баланса, загрязнение бытовыми отходами, выпас скота на водосборной площади и т.д.) до потепления климата, которое может оказать пагубное влияние на рыб.

Климат на территории Республики Татарстан за последние 30 лет серьезно изменился в сторону потепления (Askeyev et al., 2018, 2020, 2022). Если указанная тенденция продолжится, то многие бореальные виды могут столкнуться с проблемами выживания (Buisson et al., 2013; Comte et al., 2013). Встречаемость и численность многих видов рыб, особенно реофильного комплекса, снизились в разы по сравнению с их историческим распространением на территории Республики Татарстан (Аськеев, 2016; Аськеев и др., 2016). Поэтому малые реки и их ихтиофауна нуждаются в особенно тщательном мониторинге и охране. Важно иметь информацию как о современном

распространении, встречаемости и численности отдельных видов, так и о популяционных характеристиках ихтиофауны в контексте возможных трансформаций экосистем. При этом рациональное использование и охрана рыб могут быть удовлетворительно осуществлены только при анализе всех факторов среды (Buisson et al., 2008; Askeyev et al., 2015, 2023).

Целью работы является выявление и анализ закономерностей распределения населения рыб малых рек Республики Татарстан в зависимости от факторов окружающей среды.

Материал и методы исследования

Республика Татарстан (РТ) находится на крайнем востоке Европейского субконтинента, на месте слияния четырех крупнейших рек Европы: Волги, Камы, Белой и Вятки. Площадь РТ составляет 67838 км². С севера на юг территория республики растянулась на 290 км, с запада на восток – на 460 км (Атлас Республики Татарстан, 2005). РТ обладает большой орографической неоднородностью. Наибольших высот (до 380 абс. м) рельеф достигает на юго-востоке, где находится северо-западная часть Бугульмино-Белебеевской возвышенности. Наименьшие отметки приурочены к долинам рек Волги и Камы.

Всего на территории РТ было исследовано 318 участков малых рек с площадью водосбора 10–10000 км². В исследовании не рассматривают-

А



В



С



Рис. 1. Типичные водотоки регионов Республики Татарстан:

А – северо-запад, В – центральные районы,
С – юго-восток

Fig. 1. The typical rivers for different regions of the Republic of Tatarstan:

А – the north-west, В – the central regions,
С – the south-east

ся участки рек, находящиеся в подпоре расположенных на них прудов, а также в подпоре Нижнекамского и Куйбышевского водохранилищ.

На рисунке 1 приведены типичные для отдельных регионов республики реки, на которых проводился отлов ихтиофауны.

Сбор ихтиологического материала проводили ежегодно, в период с мая по сентябрь, в течение 2011–2022 гг. Отлов рыб осуществляли при помощи крупноячеистой мальковой волокуши-бредня длиной 5–15 м (с ячейкой в крыльях 5×5 мм, в кутке

3×3 мм) и рыболовными сачками (диаметр сачка 40–50 см, с ячейкой 4×4 мм). Такой набор орудий лова связан со значительной зарастаемостью берегов, наличием перекатов и быстрой сменой рыбами биотопов. При выборе орудий облова учитывались локальные и кратковременные изменения гидрологического режима, вызывающие увеличение скорости течения и повышения уровня воды. После отлова рыбы определялись до вида, подсчитывались и возвращались в естественную среду обитания.

Для каждого участка реки вычисляли: видовое богатство, общую численность рыб и индекс биологического разнообразия Шеннона – Н'. Для описания структуры населения рыб приведены данные по основным экологическим характеристикам на данных о численности: по принадлежности к типам фаун (Никольский, 1974) и образу жизни (Noble, Cowx, 2002). Следующие девять факторов окружающей среды были выбраны в качестве основных переменных, влияющих на распределение рыб в реках РТ: географическая широта; географическая долгота, высота над уровнем моря (среднее значение – 105.5 абс. м), ширина реки (7.7 м), глубина (0.71 м), скорость течения (0.31 м), степень залесенности берегов (47.9%), преобладающий субстрат дна (по числовой шкале: 1 – ил, 2 – глина или торф, 3 – песок, 4 – гравий, 5 – мелкая галька, 6 – крупные камни до 150 мм, 7 – большие камни 150–300 мм, 8 – валуны больше 300 мм), вид хозяйственной деятельности человека (ВХДЧ) по FAME (Beier et al., 2002; Kestemont, Goffaux, 2002) (по балльной шкале: 0 – нет сельского или лесного хозяйства, 1 – легкое сельскохозяйственное воздействие – сенокосы, слабый выпас и лесное хозяйство на расстоянии 0–250 м от берега реки, 2 – умеренное сельскохозяйственное воздействие – средний выпас на расстоянии 0–250 м от берега реки, наличие брода и водопоя для скота, 3 – сильное сельскохозяйственное воздействие – сильный выпас скота, видимые прогонные дорожки, пахотные земли и навесы для животных на расстоянии 0–250 м от берега реки, 4 – умеренное воздействие сельского хозяйства и загрязнение нефтью – средний выпас животных и добыча нефти на расстоянии 0–250 м от берега реки, 5 – урбанизированное воздействие – участок реки в городе или большом селе, 6 – сильное нефтяное и химическое загрязнение – чувствуется и видно химическое или нефтяное загрязнение).

Для проверки достоверности связей между факторами окружающей среды с числом видов рыб, общей численностью рыб, величиной индекса Шеннона и экологическими группами рыб

использовались обобщенные линейные модели с нормальной структурой ошибок. Наиболее подходящие модели были отобраны на основе значений информационного критерия AIC. Для выявления и визуализации связей между композицией видов рыб и факторами окружающей среды использовался метод ординации «Canonical Correspondence Analysis» (CCA). Ординация была произведена на данных о присутствии-отсутствии. В анализ были включены только те виды рыб, которые были отмечены на 7 и более участках. Таким образом, матрица данных состояла из 28 видов и 318 участков рек.

Для обработки данных использовались прикладные статистические программы Microsoft Excel, XLSTAT 2022, Past 4.12.

Результаты исследования

Всего за период исследования отловлено 40336 особей рыб 40 видов (табл. 1) и 2 гибридов (*Alburnus alburnus* × *Rutilus rutilus*, *Alburnus alburnus* × *Leuciscus*). В таксономическом плане выявленные виды относятся к классу Лучепёрые – Actinopterygii, к восьми отрядам и четырнадцати семействам. Из них 6 видов занесено в Красную Книгу РТ (2016): ручьевая форель, европейский хариус, обыкновенный подкаменщик, обыкновенная быстрянка, волжский подуст и горчак.

Наиболее богатым в видовом отношении являются: отряды карпообразные (Cypriniformes) – 27 видов (67.5% от видового богатства) и окунеобразные (Perciformes) – 5 видов (12.5%); семейства карповые (Cyprinidae) – 23 вида (57.5%), вьюновые (Cobitidae) и окуневые (Percidae) – по 3 вида (по 7.5% каждый).

Видовое богатство на участках изменялось от 1 до 23 видов (в среднем 5.5 ± 0.2), число рыб – от 1 до 1133 особей (в среднем 126.7 ± 8.5), индекс Шеннона – от 0 до 2.441 (в среднем 1.05 ± 0.03).

Двенадцать наиболее многочисленных видов (речной голянь, усатый голец, обыкновенный пескарь, уклейка, голавль, плотва, обыкновенный елец, верховка, сибирская щиповка, обыкновенная быстрянка, белоперый пескарь и окунь) в совокупности составляли 95% от всех пойманных особей рыб. Усатый голец, обыкновенный пескарь, речной голянь, голавль, обыкновенный елец, верховка, плотва, сибирская щиповка, уклейка, окунь были десятью самыми встречаемыми видами, но только усатый голец и обыкновенный пескарь были представлены более чем в половине исследованных участков.

Взаимоотношение между общей численностью, общим числом видов рыб, значением индекса Шеннона и факторами окружающей сре-

ды.

Пять факторов окружающей среды оказывали значимое влияние хотя бы на одну из рассматриваемых переменных ихтиоценоза. Так, ширина и глубина участка реки оказывали влияние на все три переменные, высота на две, а долготы и антропогенный фактор – на одну (табл. 2). Общая численность рыб увеличивалась на широких и глубоких участках рек в восточных районах республики. Видовое богатство рыб было выше на участках более глубоких и более широких рек, на меньших высотах над уровнем моря. Величина индекса Шеннона населения рыб была достоверно выше на участках водотоков с большой глубиной и шириной, небольшой высотой над уровнем моря и низкой антропогенной нагрузкой (табл. 2).

Экотопические группы и фаунистические комплексы рыб и их связь с факторами окружающей среды

В малых реках Татарстана отмечены представители трех экотопических гильдий: реофилы, эвритопы и лимнофилы. По численности доминировали представители реофильной гильдии: их доля составила 80.6% от общего числа, доля эвритопов – 14.9%, лимнофилов – 4.5%.

Доля реофилов в населении рыб была достоверно выше на участках рек с небольшой глубиной и шириной, высокой скоростью течения и большими высотами над уровнем моря. Напротив, доля эвритопов возрастала на широких и глубоких участках рек, расположенных на относительно небольших абсолютных отметках высот. Доля лимнофилов увеличивалась на реках с «мягкими» субстратами дна и низкой скоростью течения (табл. 3).

Отловленные виды рыб принадлежат семи фаунистическим комплексам: понто-каспийскому пресноводному, понто-каспийскому морскому, бореально равнинному, пресноводно амфибореальному, арктическо пресноводному, китайско равнинному и бореально предгорному. По численности среди фаунистических комплексов доминировали представители бореального предгорного комплекса, их доля достигла 50% от общего числа. Доли рыб бореального равнинного комплекса и понто-каспийского пресноводного комплекса по численности были несколько ниже: 33.3% и 15.8% соответственно. Доля представителей других гильдий незначительна и суммарно не превышает 1%.

Доля бореального предгорного комплекса в населении рыб достоверно растет на узких и мелких участках рек на большой высоте над уровнем моря с высокой скоростью течения на востоке региона (табл. 4). В отличие от бореального пред-

Таблица 1. Видовой состав рыб малых рек РТ
 Table 1. The species composition of fish in small rivers Republic of Tatarstan

Виды / Species	A*	B
Белоглазка – <i>Ballerus sapa</i> (Pallas, 1814)	1.3	0.01
Белоперый пескарёв – <i>Romanogobio albipinnatus</i> (Lukasch, 1933) – Roma	9.4	1.4
Бычок-кругляк – <i>Neogobius melanostomus</i> (Pallas, 1814)	0.3	0.07
Верховка – <i>Leucaspis delineatus</i> (Heckel, 1843) – Lede	31.1	4.4
Волжский подуст – <i>Chondrostoma variable</i> (volgensis) (Jakovlev, 1870) – Chva	4.7	0.54
Вьюн – <i>Misgurnus fossilis</i> (Linnaeus, 1758)	0.6	0.01
Голавль – <i>Squalius cephalus</i> (Linnaeus, 1758) – Sqce	44.3	4.8
Густера – <i>Blicca bjoerkna</i> (Linnaeus, 1758) – Blbj	4.4	0.47
Девятииглая колюшка – <i>Pungitius pungitius</i> (Linnaeus, 1758)	0.6	0.14
Европейский хариус – <i>Thymallus thymallus</i> (Linnaeus, 1758) – Thth	2.8	0.06
Жерех – <i>Aspius aspius</i> (Linnaeus, 1758) – Asas	3.1	0.07
Красноперка – <i>Scardinius erythrophthalmus</i> (Linnaeus, 1758) – Scer	3.8	0.14
Лещ – <i>Abramis brama</i> (Linnaeus, 1758) – Abbr	4.7	0.29
Линь – <i>Tinca tinca</i> (Linnaeus, 1758)	0.9	0.01
Налим – <i>Lota lota</i> (Linnaeus, 1758) – Lolo	4.4	0.06
Обыкновенная быстрянка – <i>Alburnoides bipunctatus</i> (Bloch, 1782) – Albi	9.1	2
Обыкновенная щиповка – <i>Cobitis taenia</i> (Linnaeus, 1758) – Cbta	13.5	0.46
Обыкновенная щука – <i>Esox lucius</i> (Linnaeus, 1758) – Eslu	8.5	0.14
Обыкновенный горчак – <i>Rhodeus amarus</i> (Bloch, 1782) – Rham	2.2	0.57
Обыкновенный елец – <i>Leuciscus leuciscus</i> (Linnaeus, 1758) – Lele	42.8	3.9
Обыкновенный ерш – <i>Gymnocephalus cernuus</i> (Linnaeus, 1758) – Gyce	8.5	0.35
Обыкновенный карась – <i>Carassius carassius</i> (Linnaeus, 1758) – Caca	2.2	0.05
Обыкновенный пескарёв – <i>Gobio gobio</i> (Linnaeus, 1758) – Gogo	73.9	15.9
Обыкновенный подкаменщик – <i>Cottus gobio</i> (Linnaeus, 1758) – Cogo	2.8	0.13
Обыкновенный сом – <i>Silurus glanis</i> (Linnaeus, 1758)	0.3	0.01
Обыкновенный судак – <i>Sander lucioperca</i> (Linnaeus, 1758)	1.6	0.03
Окунь – <i>Perca fluviatilis</i> (Linnaeus, 1758) – Pefl	26.1	1.6
Плотва – <i>Rutilus rutilus</i> (Linnaeus, 1758) – Ruru	30.8	5.3
Пухлощёкая рыба-игла – <i>Syngnathus abaster</i> (Risso, 1827)	0.3	<0.01
Речной голец – <i>Phoxinus phoxinus</i> (Linnaeus, 1758) – Phph	47.5	25.9
Ротан-головешка – <i>Perccottus glenii</i> (Dybowski, 1877)	0.6	0.01
Ручьевая форель – <i>Salmo caspius morpha fario</i> (Linnaeus, 1758) – Saca	5.4	0.24
Сазан – <i>Cyprinus carpio</i> (Linnaeus, 1758) – Cysc	2.5	0.03
Серебряный карась – <i>Carassius gibelio</i> (Bloch, 1782) – Carg	10.7	1.1
Сибирская щиповка – <i>Cobitis melanoleuca</i> (Nichols, 1925) – Cbme	31.8	1.9
Синец – <i>Ballerus ballerus</i> (Linnaeus, 1758)	0.9	0.09
Уклейка – <i>Alburnus alburnus</i> (Linnaeus, 1758) – Alal	26.1	8.7
Усатый голец – <i>Barbatula barbatula</i> (Linnaeus, 1758) – Baba	83.6	18.9
Чехонь – <i>Pelecus cultratus</i> (Linnaeus, 1758)	0.3	<0.01
Язь – <i>Leuciscus idus</i> (Linnaeus, 1758) – Leid	6.9	0.15

* А – встречаемость, %; В – доля вида, % от общего числа пойманных рыб
 A – occurrence, %; B – proportion of the species, % of the total number of fish caught

горного, доля бореально равнинного комплекса в населении рыб по численности достоверно растёт на глубоких участках рек на небольшой высоте над уровнем моря со слабым течением, а доля представителей понто-каспийского пресноводного – на широких и глубоких и равнинных участках.

Композиции видов рыб в градиентах окружающей среды

Проведенный мультивариационный анализ (ССА) показал (рис. 2), что первые две оси ординации были способны объяснить 86.9% вариаций дистанционной матрицы, основанной на население рыб и факторов среды. Первая ось ординации

Таблица 2. Регрессионные модели, суммирующие взаимосвязь между общей численностью, общим количеством видов рыб, значением индекса Шеннона и факторами окружающей среды
Table 2. Regression models summarizing the relationship between total abundance, total number of fish species, Shannon index value, and environmental factors

Параметры разнообразия населения рыб Diversity parameters of fish assemblages	Уравнение модели Model equation*	AIC	p
Общая численность Total abundance	$Y = -5.9 + 4.7\text{Ширина} + 2.3\text{Глубина} + 1.2\text{Долгота}$	312.5	<0.001
Общее число видов Total number of species	$Y = 4.7 - 2.3\text{Высота} + 0.3\text{Ширина} + 3.1\text{Глубина}$	58.9	<0.001
Индекс Шеннона Shannon Index	$Y = 1.4 - 3.3\text{Высота} + 0.7\text{Ширина} + 0.6\text{Глубина} - 2.3\text{ВХДЧ}$	51.2	<0.001

*факторы окружающей среды, включенные в модели: ширина реки (Ширина), глубина реки (Глубина), географическая долгота (Долгота), высота над уровнем моря (Высота), вид хозяйственной деятельности человека (ВХДЧ)

*The environmental factors included in the models are abbreviated as: River width (Ширина), River depth (Глубина), Geographic longitude (Долгота), Elevation (Высота), Type of human activity (ВХДЧ)

объясняла 64.4% вариаций структуры населения рыб и была достоверно связана с градиентом высоты над уровнем моря, глубиной и шириной реки ($p < 0.001$) и в меньшей степени с фактором субстрата дна реки (рис. 2). Вторая ось объясняла 22.5% вариаций и преимущественно связана с антропогенным фактором и скоростью течения ($p < 0.05$).

В целом, перемещение справа налево по первой оси демонстрировало изменение населения рыб от истоков рек к устью. На видовом уровне результаты подтверждали тот факт, что реофильные виды, такие как ручьевая форель, хариус, речной голец, подкаменщик и усатый голец, были преимущественно связаны с большими высотами и малыми по размеру реками. Потамальные виды – ерш, красноперка, щука, волжский подуст, белоперый пескарь, лещ, густера, быстрянка, налим, жерех, сазан и язь – связаны с широкими и глубокими реками, расположенными на небольшой высоте над уровнем моря. Голавль, елец, обыкновенный пескарь, обыкновенная и сибирская щиповки занимали промежуточную позицию между этими двумя группами.

Вторая ось в основном отражала влияние человека, скорость течения и географическую широту (рис. 2). Отдельные позиции на этой оси были определены для подкаменщика, ручьевой форели и хариуса, которые избегают участков с высоким уровнем воздействия человека и обитают преимущественно в реках с высокой скоростью течения на севере и юге-востоке Татарстана, и для серебряного и обыкновенного карасей, которые, в отличие от вышеуказанных видов, предпочитают водотоки с низкой скоростью течения и большим антропогенным прессом.

Обсуждение результатов

Видовой состав рыб малых рек Татарстана в целом сходен с тем, что наблюдается в других регионах Европейской части России (Котегов, 2006; Иванчева, 2008; Артаев, Ручин, 2017). Общее число видов составляет около 80% от современного видового богатства ихтиофауны Волжско-Камского края (Кузнецов, 2005). Относительно большое видовое разнообразие является следствием высокой мозаичности микроместообитаний малых рек республики, которые возникают в ре-

Таблица 3. Регрессионные модели, суммирующие взаимосвязь между экотопическими группами рыб и переменными окружающей среды
Table 3. Regression models summarizing the relationship between fish ecotopic groups and environmental variables

Экотопическая группа Ecotopic group	Уравнение модели Model equation	AIC	p
Реофилы Rheophiles	$Y = 6.0 + 1.7\text{Высота} - 0.8\text{Ширина} + 2.2\text{Скорость} - 1.4\text{Глубина}$	200.9	<0.001
Эвритопы Eurytopes	$Y = 5.2 - 1.3\text{Высота} + 1.2\text{Ширина} + 1.3\text{Глубина}$	187.1	<0.001
Лимнофилы Limnophiles	$Y = 4.1 - 1.7\text{Субстрат} - 2.7\text{Скорость}$	157.6	<0.001

Таблица 4. Регрессионные модели, суммирующих взаимосвязь между фаунистическими комплексами рыб и переменными окружающей среды

Table 4. Regression models summarizing the relationship between fish faunal complexes and environmental variables

Фаунистический комплекс Faunistic complex	Уравнение модели Model equation	AIC	p
Бореально предгорный Boreal submontanus	$Y = 2.5 + 0.7 \text{Высота} - 1.0 \text{Ширина} + 3.1 \text{Скорость} - 2.6 \text{Глубина} + 1.0 \text{Долгота}$	213.5	<0.001
Бореально равнинный Boreal lowland	$Y = 1.9 - 0.6 \text{Высота} - 3.7 \text{Скорость} + 1.7 \text{Глубина}$	202.7	<0.001
Понто-каспийский пресноводный Ponto-Caspian freshwater	$Y = 1.8 - 0.8 \text{Высота} + 1.1 \text{Ширина} + 2.1 \text{Глубина}$	182.7	<0.001

зультате разветвленной гидрологической сети, смещения ландшафтов лесной и лесостепной зон, ярко-выраженной неоднородности орографической структуры региона и взаимообогащения южной понто-каспийской и бореальных ихтиологических фаун.

Сравнивая частоту встречаемости рыб в реках республики и стран западной Европы, можно отметить сильные различия между некоторыми видами. Так, например, вероятность обнаружения ручьевой форели (Pont et al., 2005; Fieseler, Wolter, 2006; Logez et al., 2012), подкаменщика (Pont et al., 2005; Fieseler, Wolter, 2006; Birzaks, 2012) и быстрянки (Logez et al., 2012; Maire et al., 2016) в реках Европы в разы выше, чем в реках РТ. На наш взгляд, данные различия вызваны продолжительным влиянием спрямления русел водотоков, строительством большого числа каналов, увели-

чивающих скорость течения и серьезным улучшением качества вод в реках Западной Европы, что и оказало благоприятное воздействие на состояние популяций данных видов. Другими возможными причинами этих различий является генетическая неоднородность популяций форели западной и северной Европы с популяциями данного вида, живущими на крайнем востоке континента (Maric et al., 2016). Повсеместная акклиматизация ручьевой форели во многие реки Европы также привела к увеличению численности и встречаемости данного вида.

В то же время, встречаемость обыкновенного ельца (Pont et al., 2005; Fieseler, Wolter, 2006; Jurajda et al., 2010), язя (Jurajda et al., 2010; Maire et al., 2016), верховки (Fieseler, Wolter 2006; Jurajda et al., 2010; Maire et al., 2016) и уклейки (Pont et al., 2005; Fieseler, Wolter, 2006) в реках Татарстана превышает аналогичные показатели в западноевропейских реках.

Несмотря на большое общее число видов рыб, средняя величина индекса Шеннона в малых реках РТ сравнительно ниже, чем в других областях европейского субконтинента. Например, на разных участках р. Эльба (Jurajda et al., 2010) она варьирует от 1.49 до 1.71; в малых реках бассейна р. Мокша (Артаев, 2011) величина индекса Шеннона составляет в среднем 1.24. В реках Латвии (Birzaks, 2012) величина индекса Шеннона составляет 1.5 и возрастает с увеличением глубины и ширины рек. При этом увеличение индекса в основном связано с возрастанием разнообразия микроместообитаний, что дает возможности и условия для существования большего числа видов рыб. Относительно низкий индекс Шеннона в малых реках РТ объясняется в том числе и тем, что во многих их них обитает лишь один-три вида рыб,

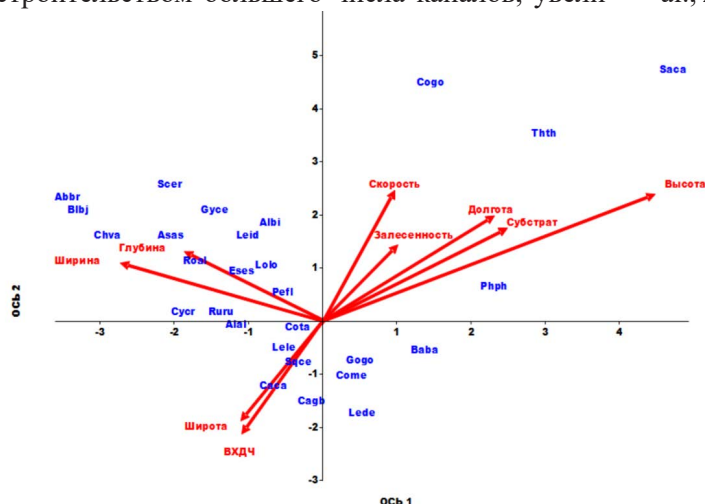


Рис. 2. Ординация ССА. Население рыб и факторы окружающей среды на данных о присутствии и отсутствии. Переменные окружающей среды показаны векторами. Аббревиатуры названий рыб приведены в таблице 1

Fig. 2. CCA Ordination. Fish population and environmental factors on presence and absence data. Environmental variables are shown as vectors. Abbreviated names of fishes are given in table 1

которые образуют многочисленные популяции. Немаловажно отметить и небольшое среднее число видов рыб (5.5), фиксируемое на отдельных участках рек. Для сравнения, в реках Латвии (Birzaks, 2012) среднее число видов рыб на участке составляет 11.

В отличие от видового богатства, общая численность рыб в реках Татарстана не зависит от фактора высоты над уровнем моря (табл. 2). Видовой состав в реках эволюционно детерминирован и преимущественно является статичным, в то время как численность зависит от экологических условий на конкретном участке и может быстро меняться со временем под воздействием геоморфологических, климатических или антропогенных факторов.

По экотопическим группировкам и фаунистическим комплексам в общей численности населения рыб малых рек РТ доминировали представители реофилов и бореального предгорного комплекса. Таким образом, малые водотоки представляют собой резерват для сохранения типичных бореальных и реофильных видов рыб в контексте глобальных климатических изменений. В частности, образованная в 2016 г. по результатам наших исследований региональная особо охраняемая природная территория – памятник природы «Лесостепь Рычкова», включает в себя ряд участков р. Шайтанка, для которых характерна наибольшая концентрация редких и исчезающих видов рыб, таких, как европейский хариус, ручьевая форель и подкаменщик.

Реакция типичной фауны рыб верхнего течения малых рек (холодноводной) к условиям среды отличается от таковой у видов, населяющих большие, тепловодные реки и отражает хорошо известные «fish zones» (Huet, 1959). Основными факторами среды, влияющими на видовую композицию населения рыб, являются высота над уровнем моря, ширина и глубина участка реки. Сильное влияние высоты над уровнем моря на композицию рыб отмечено в работах во многих частях света (Huet, 1959; Carvajal-Quintero et al., 2015; Askeyev et al., 2017; Cheng et al., 2019; Ponomarev, Loskutova, 2020). Однако, имеются ряд исследований (Oberdorff, Porcher, 1992; Vehanen et al., 2010) говорящих, что на равнинных реках Европы (с отметками от 0 до 300 абс. м) высота над уровнем моря не играет определяющей роли в структуре населения рыб. Такие противоречивые данные, прежде всего, связаны, с одной стороны, с большими контрастами условий среды на востоке Европы, а с другой – с различной степенью антропогенной нагрузки. В настоящее время почти все экосистемы западно- и централь-

но-европейских рек являются одними из наиболее нарушенных человеком, прежде всего, за счет спрямления русел, сооружения каналов, строительства гидротехнических сооружений (Brookes et al., 1983; Gregory, 2006; Birzaks, 2012). Вместе с акклиматизацией неаборигенных видов рыб и развитием прудовых хозяйств для увеличения запасов аборигенных видов рыб, это приводит к сильному искажению естественных градиентов распространения рыб.

Заключение

Малые реки Республики Татарстан отличаются высокие показатели видового разнообразия рыб. Из 40 обитающих здесь видов ихтиофауны два вида (усатый голец и обыкновенный пескарь) отмечены более чем в половине исследованных водотоков. Вероятность обнаружения отдельных видов рыб существенно отличается от показателей, характерных для бассейнов рек Западной Европы.

Основными факторами, влияющими на распределение отдельных видов и на различные характеристики населения рыб региона, являются высота над уровнем моря, ширина и глубина реки. Другие факторы среды также могут достоверно влиять на видовое богатство и численность рыб. Установлено, что в реках Республики Татарстан среди редких видов рыб, занесенных в «Красную книгу РТ», наиболее часто встречаемым и многочисленным видом является обыкновенная быстрянка. Современное состояние популяций ручьевой форели, европейского хариуса, подкаменщика и горчака в малых реках республики вызывает серьезные опасения из-за наблюдаемых тенденций быстрого потепления климата на востоке Европы.

Список литературы

1. Артаев О.Н. Рыбное население р. Мокши: современный видовой состав, распределение и экология: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Саранск, 2011. 22 с.
2. Артаев О.Н., Ручин А.Б. Рыбное население бассейна реки Мокши. Саранск, 2017. 248 с.
3. Аськеев А.О. Современное состояние ручьевой форели в реках Республики Татарстан // Сборник научных трудов молодых ученых (по материалам II Республиканской молодежной экологической научной конференции). Казань: Изд-во АН РТ, 2016. С. 10–21.
4. Аськеев А.О., Аськеев О.В., Аськеев И.В., Монахов С.П. Численность, встречаемость, историческое и современное распространение европейского хариуса и налима в градиентах окружающей среды в реках Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2016. №4. С. 17–22.
5. Атлас Республики Татарстан. М.: ПКО «Картография», 2005. 215 с.
6. Иванчева Е.Ю. Сравнительный анализ видовой струк-

туры рыбного населения малых рек Рязанской области: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Борок, 2008. 25 с.

7. Котеков Б.Г. Фауна и экология рыб малых рек Удмуртии. Ижевск: Научная книга, 2006. 96 с.

8. Красная Книга Республики Татарстан. Животные, растения, грибы. Издание третье. Казань: Идел-Пресс, 2016. 760 с.

9. Кузнецов В.А. Рыбы Волжско-Камского края. Казань: Идел-Пресс, 2005. 208 с.

10. Никольский Г.В. Экология рыб. М.: Высшая школа, 1974. 367 с.

11. Askeyev O., Askeyev I., Askeyev A., Monakhov S., Yanybaev N. River fish assemblages in relation to environmental factors in the eastern extremity of Europe (Tatarstan Republic, Russia) // *Environmental biology of fishes*. 2015. Vol. 98, №5. P. 1277–1293. doi: 10.1007/s10641-014-0358-0.

12. Askeyev A., Askeyev O., Yanybaev N., Askeyev I., Monakhov S., Marić S., Hulsman K. River fish assemblages along an elevation gradient in the eastern extremity of Europe // *Environmental biology of fishes*. 2017. Vol. 100, №5. P. 585–596. doi: 10.1007/s10641-017-0588-z.

13. Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I. Recent climate change has increased forest winter bird densities in East Europe // *Ecological research*. 2018. Vol. 33, №2. P. 445–456. doi: 10.1007/s11284-018-1566-4.

14. Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I., Sparks T. Rapid climate change has increased post-breeding and autumn bird density at the eastern limit of Europe // *Ecological research*. 2020. Vol. 35, №1. P. 235–242. doi: 10.1111/1440-1703.12079.

15. Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I., Sparks T. Extreme temperatures help in identifying thresholds in phenological responses // *Global ecology and biogeography*. 2022. Vol. 31, №2. P. 321–331. doi: 10.1111/geb.13430.

16. Askeyev O., Monakhov S., Askeyev I., Askeyev A., Sparks T.H. Fish assemblages in lakes along environmental gradients at the eastern edge of Europe // *Environmental biology of fishes*. 2023. Vol. 106. P. 1265–1276. doi: 10.1007/s10641-023-01414-0.

17. Beier U., Degerman E., Wirlöf H. Data input to the ACCESS-2000 database FIDES (Fish Database of European Streams). The FAME project, 2002. 50 p.

18. Birzaks J. Occurrence, abundance and biomass of fish in rivers of Latvia in accordance with river typology // *Zoology and ecology*. 2012. Vol. 22, №1. P. 9–19. doi: 10.1080/21658005.10.1080/21658005.

19. Brookes A., Gregory K., Dawson F. An assessment of river channelization in England and Wales // *Science of the total environment*. 1983. Vol. 27. P. 97–111. doi: 10.1016/0048-9697(83)90149-3.

20. Buisson L., Blanc L., Grenouillet G. Modelling stream fish species distribution in a river network: the relative effects of temperature versus physical factors // *Ecology of freshwater fish*. 2008. Vol. 17, №2. P. 244–257. doi: 10.1111/j.1600-0633.2007.00276.x.

21. Buisson L., Grenouillet G., Villéger S., Canal J., Laffaille P. Toward a loss of functional diversity in stream fish assemblages under climate change // *Global change biology*. 2013. Vol. 19, №2. P. 387–400. doi: 10.1111/gcb.12056.

22. Carvajal-Quintero J.D., Escobar F., Alvarado F., Villanavarró F.A., Jaramillo-Villa Ú., Maldonado-Ocampo J.A. Variation in freshwater fish assemblages along a regional elevation gradient in the northern Andes, Colombia // *Ecology and evolution*. 2015. Vol. 5, №13. P. 2608–2620. doi: 10.1002/ece3.1539.

23. Cheng D., Zhao X., Song J., Sun H., Wang S., Bai H., Li Q. Quantifying the distribution and diversity of fish species along elevational gradients in the Weihe river basin, northwest China // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, №21. P. 61–77. doi: 10.3390/su11216177.

24. Comte L., Grenouillet G. Do stream fish track climate change? Assessing distribution shifts in recent decades // *Ecography*. 2013. Vol. 36, №11. P. 1236–1246. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00282.x.

25. Fieseler C., Wolter C. A fish-based typology of small temperate rivers in the northeastern lowlands of Germany // *Limnologia*. 2006. Vol. 36, №1. P. 2–16. doi: 10.1016/j.limnol.2005.10.001.

26. Gregory K.J. The human role in changing river channels // *Geomorphology*. 2006. Vol. 79. P. 172–191. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.06.018.

27. Huet M. Profiles and biology of western European streams as related to fish management // *Transactions of the American fisheries society*. 1959. Vol. 88, №3. P. 155–163.

28. Jurajda P., Janáč M., Valová Z., Streck G. Fish community in the chronically polluted middle Elbe River // *Journal of vertebrate biology*. 2010. Vol. 59, №2. P. 157–168. doi: 10.2525/fzo.v59.i2.a10.2010.

29. Kestemont P., Goffaux D. Metric Selection and Sampling Procedures for FAME (D 4–6). Final report, the FAME project, 2002. 90 p.

30. Logez M., Bady P., Pont D. Modelling the habitat requirement of riverine fish species at the European scale: sensitivity to temperature and precipitation and associated uncertainty // *Ecology of freshwater fish*. 2012. Vol. 21, №2. P. 266–282. doi: 10.1111/j.1600-0633.2011.00545.x.

31. Maire A., Laffaille P., Maire J. F., Buisson L. Identification of priority areas for the conservation of stream fish assemblages: implications for river management in France // *River research and applications*. 2017. Vol. 33, №4. P. 524–537. doi: 10.1002/rra.3107.

32. Marić S., Askeyev O., Askeyev A., Monakhov S., Yanybaev N., Askeyev I., Galimova D., Snoj A. Lack of mtDNA variation among remote middle Volga and upper Ural brown trout suggests recent and rapid recolonization // *Journal of applied ichthyology*. 2016. Vol. 32, №5. P. 948–953. doi: 10.1111/jai.13126.

33. Noble R., Cowx I. Development of river-type classification system (D1), complication and harmonisation of fish species classification (D2), final report. Development, Evaluation and implementation of a standardised fish-based assessment method for the ecological status of European rivers – a contribution to the Water Framework Directive (FAME), 2002. 51 p.

34. Oberdorff T., Porcher J.P. Fish assemblage structure in Brittany streams (France) // *Aquatic living resources*. 1992. Vol. 5, №3. P. 215–223. doi: 10.1051/alr:1992021.

35. Ponomarev V.I., Loskutova O.A. Effect of elevation gradient on the structure of aquatic communities in the Vangry river basin, the Subpolar Urals // *Russian journal of ecology*. 2020. Vol. 51, №1. P. 72–81. doi: 10.1134/S1067413620010099.

36. Pont D., Hugueny B., Oberdorff T. Modelling habitat requirement of European fishes: do species have similar responses to local and regional environmental constraints? // *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*. 2005. Vol. 62, №1. P. 163–173. doi: 10.1139/f04-183.

37. Vehanen T., Sutela T., Korhonen H. Environmental assessment of boreal rivers using fish data—a contribution to the Water Framework Directive // *Fisheries management and ecology*. 2010. Vol. 17, №2. P. 165–175. doi: 10.1111/j.1365-2400.2009.00716.x.

References

1. Artaev O.N., Rybnoe naselenie r. Mokshi: sovremennyy vidovoy sostav, raspredelenie, ekologiya [The fish population of the r. Moksha: modern species composition, distribution, ecology]. Summary of PhD (Cand. of Biol.). Saransk, 2011. 22 p.

2. Artaev O.N., Ruchin A.B. Rybnoe naselenie bassejna reki

Mokshi [Fish population of the Moksha river basin]. Saransk, 2017. 248 p.

3. As'keyev A.O. Sovremennoe sostoyanie ruch'evoy foreli v rekah Respubliki Tatarstan [The current state of brook trout in the rivers of the Republic of Tatarstan] // Sbornik nauchnyh trudov molodyh uchenykh (po materialam II Respublikanskoj molodezhnoj ekologicheskoy nauchnoj konferencii). Kazan', 2016. P. 10–21.

4. As'keyev A.O., As'keyev O.V., As'keyev I.V., Monahov S.P. Chislennost', vstrechaemost', istoricheskoe i sovremennoe rasprostraneniye evropejskogo hariusa i nalima v gradientah okruzhayushchej sredy v rekah Respubliki Tatarstan [Number, occurrence, historical and present distribution of European grayling and burbot along environmental gradients in rivers of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2016. No 4. P. 17–22.

5. Atlas Respubliki Tatarstan [Atlas of the Republic of Tatarstan]. Moscow, 2005. 215 p.

6. Ivancheva E.Yu. Sravnitel'nyj analiz vidovoj struktury rybnogo naseleniya malyh rek Ryazanskoj oblasti [Comparative analysis of the species structure of the fish population of small rivers of the Ryazan region]: Summary of PhD (Cand. of Biol.). Borok, 2008. 25 p.

7. Kotegov B.G. Fauna i ekologiya ryb malyh rek Udmurtii [Fauna and ecology of fish in small rivers of Udmurtia]. Izhevsk: Nauchnaya kniga, 2006. 96 p.

8. Krasnaya Kniga Respubliki Tatarstan [Red Book of the Republic of Tatarstan]. Kazan': Idel-Press, 2016. 760 p.

9. Kuznecov V.A. Ryby Volzhsko-Kamskogo kraja [Fish of the Volga-Kama region]. Kazan': Idel-Press, 2005. 208 p.

10. Nikol'skij G.V. Ekologiya ryb [Fish ecology]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. 367 p.

11. Askeyev O., Askeyev I., Askeyev A., Monakhov S., Yanybaev N. River fish assemblages in relation to environmental factors in the eastern extremity of Europe (Tatarstan Republic, Russia) // Environmental biology of fishes. 2015. Vol. 98, No 5. P. 1277–1293 doi: 10.1007/s10641-014-0358-0.

12. Askeyev A., Askeyev O., Yanybaev N., Askeyev I., Monakhov S., Marić S., Hulsman K. River fish assemblages along an elevation gradient in the eastern extremity of Europe // Environmental biology of fishes. 2017. Vol. 100, No 5. P. 585–596. doi: 10.1007/s10641-017-0588-z.

13. Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I. Recent climate change has increased forest winter bird densities in East Europe // Ecological research. 2018. Vol. 33, No 2. P. 445–456. doi: 10.1007/s11284-018-1566-4.

14. Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I., Sparks T. Rapid climate change has increased post-breeding and autumn bird density at the eastern limit of Europe // Ecological research. 2020. Vol. 35, No 1. P. 235–242. doi: 10.1111/1440-1703.12079.

15. Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I., Sparks T. Extreme temperatures help in identifying thresholds in phenological responses // Global ecology and biogeography. 2022. Vol. 31, No 2. P. 321–331. doi: 10.1111/geb.13430.

16. Askeyev O., Monakhov S., Askeyev I., Askeyev A., Sparks T.H. Fish assemblages in lakes along environmental gradients at the eastern edge of Europe // Environmental biology of fishes. 2023. Vol. 106. P. 1265–1276. doi: 10.1007/s10641-023-01414-0.

17. Beier U., Degerman E., Wirlöf H. Data input to the ACCESS-2000 database FIDES (Fish Database of European Streams). The FAME project, 2002. 50 p.

18. Birzaks J. Occurrence, abundance and biomass of fish in rivers of Latvia in accordance with river typology // Zoology and ecology. 2012. Vol. 22, No 1. P. 9–19. doi: 10.1080/21658005.

19. Brookes A., Gregory K., Dawson F. An assessment of river channelization in England and Wales // Science of the to-

tal environment. 1983. Vol. 27. P. 97–111. doi: 10.1016/0048-9697(83)90149-3.

20. Buisson L., Blanc L., Grenouillet G. Modelling stream fish species distribution in a river network: the relative effects of temperature versus physical factors // Ecology of freshwater fish. 2008. Vol. 17, No 2. P. 244–257. doi: 10.1111/j.1600-0633.2007.00276.x.

21. Buisson L., Grenouillet G., Villéger S., Canal J., Laffaille P. Toward a loss of functional diversity in stream fish assemblages under climate change // Global change biology. 2013. Vol. 19, No 2. P. 387–400. doi: 10.1111/gcb.12056.

22. Carvajal-Quintero J.D., Escobar F., Alvarado F., Villa-Navarro F.A., Jaramillo-Villa Ú., Maldonado-Ocampo J.A. Variation in freshwater fish assemblages along a regional elevation gradient in the northern Andes, Colombia // Ecology and evolution. 2015. Vol. 5, No 13. P. 2608–2620. doi: 10.1002/ece3.1539.

23. Cheng D., Zhao X., Song J., Sun H., Wang S., Bai H., Li Q. Quantifying the distribution and diversity of fish species along elevational gradients in the Weihe river basin, northwest China // Sustainability. 2019. Vol. 11, No 21. P. 61–77. doi: 10.3390/su11216177.

24. Comte L., Grenouillet G. Do stream fish track climate change? Assessing distribution shifts in recent decades // Ecography. 2013. Vol. 36, No 11. P. 1236–1246. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00282.x.

25. Fieseler C., Wolter C. A fish-based typology of small temperate rivers in the northeastern lowlands of Germany // Limnologia. 2006. Vol. 36, No 1. P. 2–16. doi: 10.1016/j.limno.2005.10.001.

26. Gregory K.J. The human role in changing river channels // Geomorphology. 2006. Vol. 79. P. 172–191. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.06.018.

27. Huet M. Profiles and biology of western European streams as related to fish management // Transactions of the American fisheries society. 1959. Vol. 88, No 3. P. 155–163.

28. Jurajda P., Janáč M., Valová Z., Streck G. Fish community in the chronically polluted middle Elbe River // Journal of vertebrate biology. 2010. Vol. 59, No 2. P. 157–168. doi: 10.25225/fozo.v59.i2.a10.2010.

29. Kestemont P., Goffaux D. Metric Selection and Sampling Procedures for FAME (D 4–6). Final report, the FAME project, 2002. 90 p.

30. Logez M., Bady P., Pont D. Modelling the habitat requirement of riverine fish species at the European scale: sensitivity to temperature and precipitation and associated uncertainty // Ecology of freshwater fish. 2012. Vol. 21, No 2. P. 266–282. doi: 10.1111/j.1600-0633.2011.00545.x.

31. Maire A., Laffaille P., Maire J. F., Buisson L. Identification of priority areas for the conservation of stream fish assemblages: implications for river management in France // River research and applications. 2017. Vol. 33, No 4. P. 524–537. doi: 10.1002/rra.3107.

32. Marić S., Askeyev O., Askeyev A., Monakhov S., Yanybaev N., Askeyev I., Galimova D., Snoj A. Lack of mtDNA variation among remote middle Volga and upper Ural brown trout suggests recent and rapid recolonization // Journal of applied ichthyology. 2016. Vol. 32, No 5. P. 948–953. doi: 10.1111/jai.13126.

33. Noble R., Cowx I. Development of river-type classification system (D1), complication and harmonisation of fish species classification (D2), final report. Development, Evaluation and implementation of a standardised fish-based assessment method for the ecological status of European rivers – a contribution to the Water Framework Directive (FAME), 2002. 51 p.

34. Oberdorff T., Porcher J.P. Fish assemblage structure in Brittany streams (France) // Aquatic living resources. 1992. Vol. 5, No 3. P. 215–223. doi:10.1051/alr:1992021.

35. Ponomarev V.I., Loskutova O.A. Effect of elevation gradient on the structure of aquatic communities in the Vangyr river basin, the Subpolar Urals // Russian journal of ecology. 2020. Vol. 51, No 1. P. 72–81. doi:10.1134/S1067413620010099.

36. Pont D., Hugueny B., Oberdorff T. Modelling habitat requirement of European fishes: do species have similar responses to local and regional environmental constraints? // Canadian journal of fisheries and aquatic sciences. 2005. Vol. 62, No 1. P. 163–173. doi: 10.1139/f04-183.

37. Vehanen T., Sutela T., Korhonen H. Environmental assessment of boreal rivers using fish data—a contribution to the Water Framework Directive // Fisheries management and ecology. 2010. Vol. 17, No 2. P. 165–175. doi: 10.1111/j.1365-2400.2009.00716.x.

Askeyev A.O., Askeyev I.V., Monakhov S.P., Askeyev O.V. **Fish assemblages of small rivers in the east edge of Europe in environmental gradients.**

On the territory of the Republic of Tatarstan, 318 sites of small rivers were studied, in which 40 species of fish were caught, but only stone loach and common gudgeon were founded in more than half of the all sites. The twelve most numerous species of fish: river minnow, stone loach, common gudgeon, bleak, chub, roach, common dace, sunbleak, Siberian spined loach, spirin, perch and white-finned gudgeon together accounted for 95% of all caught individuals. The species richness of fish and the value of the Shannon Index tend to increase in wide and deep sites of fish at low altitudes above sea level. The main environmental factors determining the composition of individual fish species on small rivers in the east edge of the European subcontinent were: elevation, width and depth of the river.

Keywords: small rivers; fish population; environmental factors; Shannon Index; Republic of Tatarstan.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 20.06.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 05.07.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 19.07.2023

Информация об авторах

Аськеев Артур Олегович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: art.regulus@mail.ru.

Аськеев Игорь Васильевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань ул. Даурская, 28, E-mail: archaeozoologist@yandex.ru.

Монахов Сергей Павлович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань ул. Даурская, 28, E-mail: serega-28@inbox.ru.

Аськеев Олег Васильевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: parus.cyanus@rambler.ru.

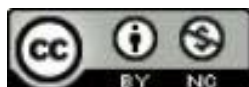
Information about the authors

Arthur O. Askeyev, Ph.D. in Biology, Researcher, Research Institute for Problems or Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: art.regulus@mail.ru.

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

Sergey P. Monakhov, Researcher, Research Institute for Problems or Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya str. Kazan, 420087, Russia, E-mail: serega-28@inbox.ru.

Oleg V. Askeyev, Ph.D. in Biology, Head of Laboratory, Research Institute for Problems or Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: parus.cyanus@rambler.ru



Г.И. Ложкин, Н.А. Чижикова, Д.В. Тишин, Э.И. Насырова
Казанский (Приволжский) федеральный университет, kpfuecology@gmail.com

РЕГИОНАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ РОСТА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В МЕСТООБИТАНИЯХ РАЗНОЙ УВЛАЖНЕННОСТИ

В статье приведены результаты анализа ширины годичных колец 125 деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., произрастающей на территории Среднего Поволжья. Сравнены региональные кривые роста сосны обыкновенной, исследованной в разных по степени увлажнения местообитаниях. Анализ показал, что форма кривой радиального роста является характерным признаком, свойственным определенному типу местообитания по уровню влагообеспеченности.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; годичные кольца; болото; суходол; региональная кривая роста.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.22.27>

Введение

Годичные кольца деревьев содержат информацию о событиях в природных экосистемах, поэтому их обычно используют для реконструкции параметров внешней среды за длительные интервалы времени с годичным временным разрешением.

Климатическая составляющая в реакции деревьев на условия произрастания проявляется в высокочастотных сигналах хронологий годичных колец, поэтому при выделении климатической составляющей в древесных хронологиях региональные кривые радиального роста применяются для устранения тенденций изменения ширины колец, проявляющейся с возрастом деревьев. Считается, что региональные кривые роста (РКР), используемые для стандартизации измерений древесных колец, отражают внутренние закономерности роста деревьев, связанные с биологическими и возрастными особенностями вида, свойственными рассматриваемой территории (Bontemps, Esper, 2011; Naurzbaev et al., 2004).

Региональные кривые роста используются в классической дендрохронологии в качестве основы для устранения трендов, не связанных с внешними факторами, с применением данных о ширине годичных колец. Региональная кривая роста представляет собой временной ряд, где в качестве шага выступает возраст дерева, а в качестве значений – ожидаемый (усредненный) показатель прироста. При использовании РКР существует некоторая неопределенность в определении возраста: в идеале, при построении региональных кривых каждый из имеющихся индивидуальных рядов со значениями радиального прироста должен начинаться с наиболее молодого кольца, однако на

практике не всегда удается получить значения параметров колец ранних лет, и, как следствие, РКР часто недооценивает значения прироста ранних колец (Briffa, 1992). Тем не менее методы стандартизации с использованием региональной кривой роста превосходят традиционные методы стандартизации с точки зрения сохранения низкочастотной изменчивости во временном ряде, в этом контексте РКР рассматривают как решение проблемы «segment length curse»). При формировании усредненной кривой роста предполагается подавление влияния на оценку размера колец разнонаправленных неклиматических факторов, что делает этот подход привлекательным для использования в стандартизации (Cook, 1995).

Помимо средних значений прироста, интерес вызывают и значения отклонений (Helama, 2004; Helama, 2008). Отмечено, что для более высоких значений ширины годичных колец характерны высокие значения вариации, для показателей плотности эта зависимость выражена слабее. Как правило, растения, произрастающие в более плотных популяциях, показывают отклонение значений ширины радиального прироста выше, чем растения из менее плотных популяций (Weiner, Thomas, 1986). Кроме того, региональная кривая роста в плотных популяциях имеет более вогнутую форму (Helama et al., 2005), то есть значения прироста быстрее переходят от более высоких к более низким.

Часто в целях параметризации региональной кривой прироста подбирают приблизительно описывающие функции, например, модифицированную обратную экспоненту (Fritts, 1969) или кривую Хугершофа (Warren, 1980). Меридиональная и высотная трансекты лиственницы с приме-

нением РКР изучена в работе (Naurzbaev et al., 2004). Средние значения ширины прироста в зависимости от возраста сопоставлялись в рамках каждой из трансект, при этом был отмечен градиент параметров модифицированной обратной экспоненты, описывающей РКР.

В исследовании (Stoll, 1994) значения площади колец прироста сосны обыкновенной соответствовали логнормальному закону распределения. Радиальный прирост особей определялся в первую очередь приростом ранних колец, также значимыми факторами являются возраст и наличие конкуренции; приращение молодых и маленьких деревьев лучше описывалось экспоненциальной моделью, в то время как возрастные особи – сигмоидальной функцией.

У сосны обыкновенной в избыточно-увлажненных местообитаниях обычно наблюдается низкий радиальный прирост годовых колец, что свидетельствует о неблагоприятных почвенно-грунтовых условиях. Вместе с тем, для сосен, произрастающих на болоте, удастся установить связь радиального прироста с климатом. Так, например, общим лимитирующим фактором радиального прироста болотной сосны на территории Марийского Полесья являются погодные условия мая (Тишин и др., 2021).

Целью данной работы являлось выявление особенностей радиального роста с помощью РКР, характерных для сосны обыкновенной, произрастающей в разных типах местообитаний Среднего Поволжья.

Материал и методика исследования

В работе были использованы данные по 125 деревьям сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. с 10 пробных площадок, расположенных в регионах Среднего Поволжья (республики Татарстан, Марий Эл, Ульяновская область) из базы Dendrochron (Тишин, Чижикова, 2013) (рис. 1). Четыре площадки были заложены на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

Первые годы жизни деревьев хуже обеспечены данными, в базе данных мало реально измеренных колец на первом, втором и последующих го-

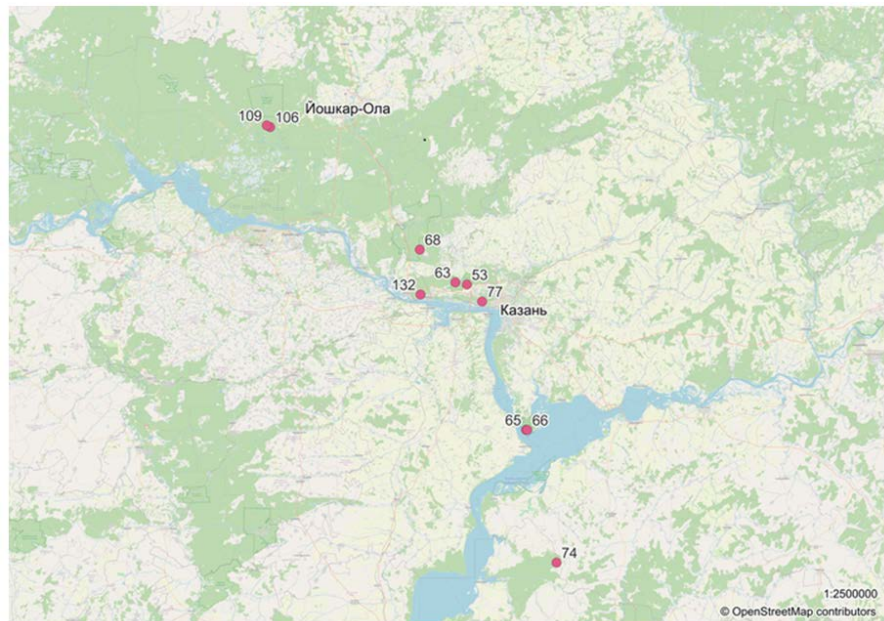


Рис. 1. Местоположение исследуемых участков

Fig. 1. Location of the studied sites

дах жизни. По этой причине для данного периода высока неопределенность оценок размеров колец. Возраст особей уточнялся с использованием метода палетки.

В целом, все исследованные местообитания можно разделить на три категории по уровню влагообеспеченности (влажности почвы): высокое влагообеспечение (сосняки сфагновые), среднее влагообеспечение (сосняки черничники) и низкое влагообеспечение (сосняки лишайниковые). Подробнее информация для каждого местообитания представлена в таблице 1.

Исследуемые участки расположены не на границе ареала сосны обыкновенной, в связи чем можно полагать, что температура не является лимитирующим фактором, ограничивающим ее радиальный прирост. Таким образом, использование региональных кривых роста для удаления возрастного тренда и вычисления индексов радиального роста сосны, произрастающей в Поволжье, можно считать корректным, так как климатический (температурный) тренд оказывает незначительное влияние на кривые роста и не приводит к их искажению.

В работе рассматривались различные методы построения РКР (локальная полиномиальная регрессия, скользящее среднее и др.) на основе данных прироста сосен, произрастающих на сфагновой сплаvine озера Долгое Раифского участка ВКГПБЗ, представленных максимальным объемом выборки – 42 дерева (Тишин, Чижикова, 2013). Показано, что наилучшими свойствами для построения РКР обладает обобщенная регрессионная нелинейная модель (Generalized Linear Model,

Таблица 1. Характеристики исследованных местообитаний
Table 1. Description of studied habitats

ID участка Site ID	Расположение местообитания Habitat location	Характеристика растительности Description of vegetation	Почва Soil	Влажность почвы Soil moisture category
53	Болото «Долгое», Раифский участок ВКГПБЗ, кв. 119/120, Татарстан	Сосняк сфагново- кустарничковый	Торфяная	Высокая
63	Раифский участок ВКГПБЗ, кв. 25, Татарстан	Сосняк зеленомошный с черникой	Дерново- подзолистая	Средняя
65	Саралинский участок ВКГПБЗ, кв. 43, Татарстан	Сосняк лишайниковый	Дерново- подзолистая	Низкая
66	Саралинский участок ВКГПБЗ, кв. 49, Татарстан	Сосняк лишайниково- мшистый	Дерново- подзолистая	Низкая
68	Национальный парк «Марий-Чодра», Марий Эл	Сосняк лишайниково- мшистый	Дерново- подзолистая	Низкая
74	Долина р. Утка, Ульяновская область	Сосняк ландышево- вейниковый	Дерново- подзолистая	Низкая
77	Пригородное лесничество, кв. 90, лесопарк Лебяжье, г. Казань, Татарстан	Сосняк лишайниковый	Дерново- подзолистая	Низкая
106	Болото «Илюшкино», Медведевский район, Марий Эл	Сосняк сфагново- кустарничковый	Торфяная	Высокая
109	Болото «Дачное», в районе п. Старожильск, Марий Эл	Сосняк сфагново- кустарничковый	Торфяная	Высокая
132	Болото «Маяк», окрестности г. Зеленодольск, Татарстан	Сосняк сфагново- кустарничковый с единичной березой	Торфяная	Высокая

GLM; Dobson, 1990). Все вычисления были проведены с помощью функций и пакетов среды статистического программирования R (R Core team, 2020). В качестве модели, связывающей размер колец с возрастом дерева, была выбрана обобщенная регрессионная модель, реализованная через функцию `glm` пакета `stats` и предполагающая неотрицательные значения гамма-распределенной зависимой переменной. В качестве аппроксиматора нелинейной связи был использован `b-spline` с 4 узлами.

Модели были построены как для каждого местообитания, так и для типов местообитаний, где для каждого уровня влагообеспечения была построена единая модель. Для модели кривой радиального роста деревьев в местообитании с высокой влагообеспеченностью потребовалось ввести веса, обратно пропорциональные количеству деревьев в местообитании, чтобы снизить влияние самого большого (42 дерева) влажного местообитания (болото Долгое, ID 53).

Результаты и их обсуждение

Модели кривых радиального роста, вычисленные для трех уровней влагообеспеченности ме-

стообитаний, представлены на рисунке 2.

Несмотря на недостаток влаги в почве, ширина годовых колец в местообитаниях с низкой влажностью в целом выше, чем в местообитаниях с более высокой влажностью, особенно в начале роста сосны. Можно предположить, что условия сухих лишайниковых сосняков более благоприятны для прорастания сосен и для их роста в целом, чем условия сфагновых болот. В условиях низкой влагообеспеченности для молодых деревьев создается преимущество в росте в связи с небольшой конкуренцией в кустарниковом ярусе. В условиях повышенной влажности торможение ростовых процессов молодого дерева вызвано излишней увлажненностью почв, а также внутривидовой и межвидовой конкуренцией за ресурсы.

Модель местообитания со средней влагообеспеченностью по форме кривой близка к модели с высокой влагообеспеченностью (рис. 2), так как имеет максимум ширины годовых колец, наблюдаемый в возрасте 37 лет (1.7 мм). Однако общий уровень значений ширины колец как в начале, так и к 130 годам (0.77 мм), в большей степени близок к модели с низкой влажностью.

В возрасте свыше 20 лет радиальный прирост

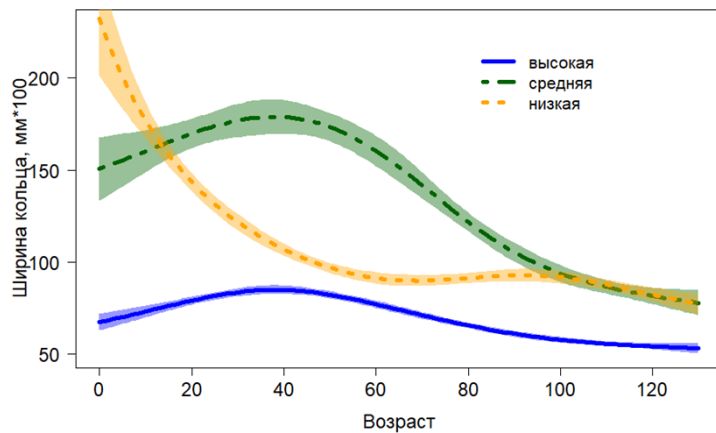


Рис. 2. Сравнение региональных кривых роста, полученных с помощью обобщенной регрессионной модели. Тип линии обозначает влагообеспеченность местообитания

Fig. 2. Comparison of regional growth curves obtained by the generalized regression model. The line type indicates the soil moisture content of the habitat

сосны из среднеувлажненных местообитаний превосходит прирост особей из менее увлажненных. Это можно объяснить недостатком почвенной влаги, проявляющимся в условиях боровых комплексов. Данный вывод согласуется с результатами работы (Иванов и др., 2015), где, в частности, было показано, что повышение уровня воды в оз. Большое Глубокое (г. Казань) привело к заметному увеличению радиального прироста произрастающих в непосредственной близости от береговой зоны экземпляров сосны обыкновенной, по сравнению с деревьями, находящимися на более высоких отметках рельефа.

Следует также отметить необходимость анализа большего числа местообитаний промежуточного уровня влагообеспеченности, чтобы выявить характерный для них спектр форм кривой радиального прироста.

Заключение

Получены модели радиального прироста сосны обыкновенной, соответствующие местообитаниям низкой, средней и высокой влажности в условиях Среднего Поволжья. Форма кривой радиального прироста является признаком, характеризующим уровень влагообеспеченности местообитания и влажности почвы. Кривые с наименьшими размерами колец (менее 1 мм) соответствуют условиям избыточной почвенной влажности (сфагновых болот). Кривая радиального прироста сосны обыкновенной, произрастающей в условиях низкой влажности (местообитания лишайниковых сосняков), характеризуется наибольшими размерами колец в начале роста (2 мм) и последующим монотонным убыванием ши-

рины колец, эта кривая наиболее близка по форме к отрицательной экспоненте. Региональная кривая роста из среднеувлажненных местообитаний показывает максимум прироста в 37–40 лет, после 20 лет она превосходит по приросту деревья из сухих местообитаний. Форма кривой радиального роста колец среднеувлажненных обитаний похожа на форму кривой, характерной для избыточной влажности, с аналогичным пиком в районе 40 лет, однако ее отличает в два раза большая ширина колец.

Полученные модели кривых роста могут быть использованы для подготовки данных о радиальном приросте деревьев (стандартизации, удаления возрастного тренда и вычисления индивидуальных индексов ширины годовых колец) и последующего анализа реакции деревьев на климатические изменения и антропогенные воздействия.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Список литературы

1. Иванов Д.В., Сонин Г.В., Тишин Д.В., Иванова А.Д., Шнепп А.С. Эволюция системы Глубоких озер г. Казани в XX–XXI вв. // Российский журнал прикладной экологии. 2015. №1. С. 31–38.
2. Тишин Д.В., Чижикина Н.А. DENDROCHON. Свидетельство о государственной регистрации №2013621269 от 26.09.2013.
3. Тишин Д.В., Чижикина Н.А., Искандиров П.Ю., Лебедева Г.П. Радиальный прирост годовых колец сосны обыкновенной в условиях болот Марийского Полесья // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №4. С. 20–24.
4. Bontemps J.-D., Esper J. Statistical modelling and RCS detrending methods provide similar estimates of long-term trend in radial growth of common beech in north-eastern France // Dendrochronologia. 2011. Vol. 29. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.09.002>.
5. Briffa K.R., Jones P.D., Bartholin T.S., Eckstein D., Schweingruber F.H., Karlen W., Zetterberg P., Eronen M. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales // Climate dynamics. 1992. Vol. 7. P. 111–119. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00211153>.
6. Cook E.R., Briffa K.R., Meko D.M., Graybill D.A., Funkhouser G. The 'segment length curse' in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies // Holocene. 1995. Vol. 5. P. 229–237. doi: <https://doi.org/10.1177/095968369500500211>.
7. Dobson A. J. An introduction to generalized linear models. London: Chapman and Hall, 1990. 174 p.
8. Fritts H.C., Mosimann J.E., Bortorff C.P. A revised computer program for standardizing tree-ring series // Tree-Ring bulletin. 1969. Vol. 29. P. 15–20.
9. Helama S., Lindholm M., Timonen M., Eronen M. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a

comparison of tree-ring standardization methods // Theoretical and applied climatology. 2004. Vol. 79. P. 239–254. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0077-0>.

10. Helama S., Timonen M., Lindholm M., Meriläinen J., and Eronen M. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. // International journal of climatology. 2005. Vol. 25. P. 1767–1779. <https://doi.org/10.1002/joc.1215>.

11. Helama S., Vartiainen M., Kolström T., Peltola H., Meriläinen J. X-ray microdensitometry applied to subfossil tree-rings: growth characteristics of ancient pines from the southern boreal forest zone in Finland at intra-annual to centennial time-scales // Vegetation history and archaeobotany. 2008. Vol. 17. P. 675–686. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0147-9>.

12. Naurzbaev M.A., Hughes M., Vaganov E.A. Tree-ring growth curves as sources of climatic information // Quaternary research. 2004. Vol. 62. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.005>.

13. R core team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. 2020. <https://www.R-project.org/>

14. Stoll P., Weiner J. and Schmid B. Growth variation in a naturally established population of *Pinus sylvestris* // Ecology. 1994. Vol. 75 (3). P. 660–670. <https://doi.org/10.2307/1941724>.

15. Warren W.G. On removing the growth trend from dendrochronological data // Tree-ring bulletin. 1980. Vol. 40. P. 35–44.

16. Weiner J., Mallory E.B., Kennedy C. Growth and variability in crowded and uncrowded populations of Dwarf marigolds (*Tagetes patula*) // Annals of botany. 1990. Vol. 65. P. 513–524.

References

1. Ivanov D.V., Sonin G.V., Tishin D.V., Ivanova A.D., Shnepp A.S. Evoliutsiia sistemy Glubokikh ozer g. Kazani v XX-XXI vv. [Evolution of the system of the Deep Lakes of Kazan in the XX-XXI centuries] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2015. No 1. P. 31–38.

2. Tishin D.V., Chizhikova N.A. DENDROCHON. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii №2013621269 ot 26.09.2013. [DENROCHON. Certificate of state registration №2013621269 dated 09.26.2013].

3. Tishin D.V., Chizhikova N.A., Iskandirov P.Iu., Lebedeva G.P. Radialnyi prirost godichnykh kolets sosny obyknovЕННОй v usloviakh bolot Mariiskogo Polesia [Radial increase in Scots pine annual rings under the conditions of the bogs of the Mari Polesye] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2021. No 4. P. 20–24.

4. Bontemps J.-D., Esper J. Statistical modelling and RCS detrending methods provide similar estimates of long-term trend in radial growth of common beech in north-eastern France // Dendrochronologia. 2011. Vol. 29. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.09.002>

5. Briffa K.R., Jones P.D., Bartholin T.S., Eckstein D., Schweingruber F.H., Karlen W., Zetterberg P., Eronen M. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales // Climate dynamics. 1992. Vol. 7. P. 111–119. <https://doi.org/10.1007/BF00211153>.

6. Cook E.R., Briffa K.R., Meko D.M., Graybill D.A., Funkhouser G. The 'segment length curse' in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies // Holocene. 1995. Vol. 5. P. 229–237. doi: <https://doi.org/10.1177/095968369500500211>.

7. Dobson A. J. An introduction to generalized linear models. London: Chapman and Hall, 1990. 174 p.

8. Fritts H.C., Mosimann J.E., Bortorff C.P. A revised computer program for standardizing tree-ring series // Tree-Ring bulletin. 1969. Vol. 29. P. 15–20.

9. Helama S., Lindholm M., Timonen M., Eronen M. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods // Theoretical and applied climatology. 2004. Vol. 79. P. 239–254. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0077-0>.

10. Helama S., Timonen M., Lindholm M., Meriläinen J., and Eronen M. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. // International journal of climatology. 2005. Vol. 25. P. 1767–1779. <https://doi.org/10.1002/joc.1215>

11. Helama S., Vartiainen M., Kolström T., Peltola H., Meriläinen J. X-ray microdensitometry applied to subfossil tree-rings: growth characteristics of ancient pines from the southern boreal forest zone in Finland at intra-annual to centennial time-scales // Vegetation history and archaeobotany. 2008. Vol. 17. P. 675–686. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0147-9>.

12. Naurzbaev M.A., Hughes M., Vaganov E.A. Tree-ring growth curves as sources of climatic information // Quaternary research. 2004. Vol. 62. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.005>.

13. R core team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. 2020. <https://www.R-project.org/>

14. Stoll P., Weiner J. and Schmid B. Growth variation in a naturally established population of *Pinus sylvestris* // Ecology. 1994. Vol. 75 (3). P. 660–670. <https://doi.org/10.2307/1941724>.

15. Warren W.G. On removing the growth trend from dendrochronological data // Tree-ring bulletin. 1980. Vol. 40. P. 35–44.

16. Weiner J., Mallory E.B., Kennedy C. Growth and variability in crowded and uncrowded populations of Dwarf marigolds (*Tagetes patula*) // Annals of botany. 1990. Vol. 65. P. 513–524.

Lozhkin G.V., Chizhikova N.A., Tishin D.V., Nasyrova E.I. **Regional growth curves of *Pinus sylvestris* L. in habitats of different humidity.**

The article presents the analysis of tree-ring width of 125 individuals of *Pinus sylvestris* L., sampled in 10 sites of the Middle Volga region. The regional growth curves for Scots pine growing in three types of habitats differing in soil moisture were compared. The analysis showed that the shape of the radial growth curve is a characteristic feature of the moisture content of the habitat. The resulting models of growth curves can be further used to prepare data on the radial growth of trees and subsequent analysis of the response of trees to climate change and anthropogenic impacts.

Keywords: *Pinus sylvestris* L.; annual rings; bog; dry, regional growth curve.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 31.07.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 14.08.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 25.08. 2023

Информация об авторах

Ложкин Григорий Иванович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: lozhkin.grig@gmail.com.

Чижикова Нелли Александровна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: kukumarian@gmail.com.

Тишин Денис Владимирович, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: kpfuecology@gmail.com.

Насырова Эльвира Ильгизаровна, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: naselvira@mail.ru.

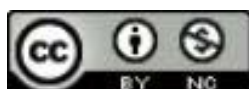
Information about the authors

Grigoriy I. Lozhkin, Postgraduate Student, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: lozhkin.grig@gmail.com.

Nelli A. Chizhikova, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: nelly.chizhikova@kpfu.ru.

Denis V. Tishin, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: kpfuecology@gmail.com.

Elvira I. Nasyrova, Postgraduate Student, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: naselvira@mail.ru.



ТРЕНДЫ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ В 2000–2022 ГГ. (ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ СЕНСОРА MODIS СПУТНИКА TERRA)

Цель работы – анализ многолетней динамики NDVI сельскохозяйственных и лесных ландшафтов Белорусского Полесья как реакции на глобальные изменения. Изучены изменения климата и землепользования в тестовых районах в 2000–2022 гг. Проведен анализ и оценка статистической значимости трендов NDVI в сельскохозяйственных и лесных ландшафтах. Обнаружена положительная корреляция NDVI сельскохозяйственных ландшафтов с летними осадками; NDVI лесных ландшафтов положительно коррелирует со среднегодовой и летней температурами. Установлена положительная корреляция NDVI лесных ландшафтов с содержанием CO₂ в атмосфере; в сельскохозяйственных ландшафтах корреляция NDVI с содержанием CO₂ отсутствует.

Ключевые слова: ландшафт; NDVI; тренд; MODIS; изменения климата; Белорусское Полесье.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.28.33>

Введение

Важным индикатором состояния ландшафтов является их продуктивность (Дронин и др., 2014), оценка которой в настоящее время основана на использовании дистанционного зондирования Земли. В условиях различных природных зон и регионов мира было установлено, что высокую степень корреляции с первичной продукцией и зеленой биомассой имеет нормализованный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), определяемый по данным многозональной космической съемки по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – значения отражения в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра (Box et al., 1989; Yengoh et al., 2014).

Величина NDVI отображает экологическое состояние растительного покрова и ландшафтов в целом (Гусев, 2020, 2022; Gusev, 2022). Использование космических съемок позволяет оценить процессы антропогенной трансформации, последствия стихийных бедствий, влияние изменений климата (Yengoh et al., 2014).

Цель работы – анализ многолетней динамики NDVI сельскохозяйственных и лесных ландшафтов Белорусского Полесья как реакции на глобальные изменения. Решаемые задачи: изучение изменений климата и землепользования в тестовых районах Белорусского Полесья в 2000–2022 гг.; анализ трендов NDVI в сельскохозяйственных и лесных ландшафтах; изучение корреляции меж-

ду климатическими показателями и NDVI; выяснение вероятных причин выявленных изменений NDVI. Предполагается ответить на три основных вопроса: 1) имеются ли в регионе статистически значимые временные тренды NDVI; 2) есть ли статистически значимая взаимосвязь между изменениями NDVI и климатических показателей; 3) есть ли отличия климатогенных реакций продуктивности сельскохозяйственных и лесных ландшафтов и какие из них наиболее чувствительны к климатическим изменениям.

Материалы и методы исследования

Район исследований находится на территории Беларуси и представляет собой восточную часть Полесской ландшафтной провинции подзоны полесских (широколиственно-лесных) ландшафтов, а согласно геоботаническому районированию – Полесско-Приднепровский округ подзоны широколиственно-сосновых лесов. По классификации природно-антропогенных ландшафтов (Марцинкевич, 2007) на территории региона выделяют следующие классы: сельскохозяйственные, сельскохозяйственно-лесные, лесные и природоохранные. Преобладают сельскохозяйственно-лесные ландшафты (77.7% от общей площади). Сельскохозяйственные ландшафты представлены пахотными (76.3% площади класса) и лугово-пахотными (23.7%) подклассами. Сельскохозяйственно-лесные ландшафты – пахотно-лесными (63.3%), лесополевыми (16.2%), лесолуговыми (9.5%), сенокосно-лесополевыми (13.3%) под-

классами. Лесные ландшафты – лесохозяйственными (85.5%) и лесоболотными (14.5%) подклассами.

Изучение трендов продуктивности и оценка влияния климатических изменений выполнялась в природно-антропогенных ландшафтах двух классов – сельскохозяйственных (9.2% площади региона) и лесных (13.1%).

Значения NDVI получены из MOD13Q1 (обработанные результаты съемки сенсора MODIS спутника Тегга), который представляет собой растр максимальных значений NDVI за 16 суток. Пространственное разрешение 250 м. Продукт MOD13Q1 находится в свободном доступе на сайте NASA. Для исключения влияния сезонных колебаний NDVI в работе использовались только летние значения. Изучение изменений структуры землепользования проводилось по космическим снимкам спутников Landsat (лето 2000 и лето 2022 гг.). Снимки получены с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Атмосферная коррекция, привязка, дешифрирование космических снимков выполнялись в QGIS 3.6.

Показатели климата (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определялись на основе данных 8 метеостанций. Данные по динамике CO₂ в атмосфере были взяты с сайта Global Monitoring Laboratory.

Изучение трендов NDVI проводили с помощью статистических методов. Для оценки точности подбора уравнения тренда использовали коэффициент детерминации R². Статистическую значимость коэффициента детерминации и уравнения тренда оценивали с помощью критерия Фишера. Для оценки связи между изменениями NDVI и климатическими показателями использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Результаты и их обсуждение

В течение рассматриваемого временного интервала наблюдались следующие изменения величины NDVI в изучаемых ландшафтах Полесья. Средняя величина NDVI в сельскохозяйственных ландшафтах Полесья изменялась от 0.623 в 2003 г. до 0.694 в 2009 г. (рис. 1). Медианные значения NDVI колебались от 0.625 в 2002 и 2003 гг. до

0.692 в 2006 г. Максимальные значения NDVI – от 0.659 в 2017 г. до 0.746 в 2009 г. Статистически значимый тренд NDVI в сельскохозяйственных ландшафтах Полесья отсутствует. Однако, в случае максимальных значений коэффициент тренда имеет отрицательную величину.

Для лесных ландшафтов Полесья характерны следующие особенности. Средние значения NDVI изменяются с 0.709 в 2000 г. до 0.785 в 2019 г. (рис. 1). Для средних значений наблюдалась положительный тренд (коэффициент тренда составил 0.002), который являлся статистически достоверным. Медианные и максимальные значения NDVI лесных ландшафтов Полесья также испытывали положительный тренд (коэффициенты тренда составляли соответственно 0.0025 и 0.0015 в год).

Можно предположить, что основными факторами, вызывающими наблюдаемые тренды NDVI, являются:

- 1) изменение структуры землепользования;
- 2) климатические изменения (повышение температуры);
- 3) увеличение содержания CO₂ в атмосфере, способствующее фотосинтезу («fertilization effect»).

Изменения структуры землепользования могут оказать значительное воздействие на величины NDVI. Так, например, анализ территории провинции Гуандун (НАО, 2022) показал, что наиболее важным фактором, обуславливающим пространственно-временные колебания NDVI в 2000–2021 гг., является изменение землепользования (79.4%), тогда как вклад климатического фактора существенно ниже (20.6% дисперсии значений NDVI).

В ходе исследований нами были получены

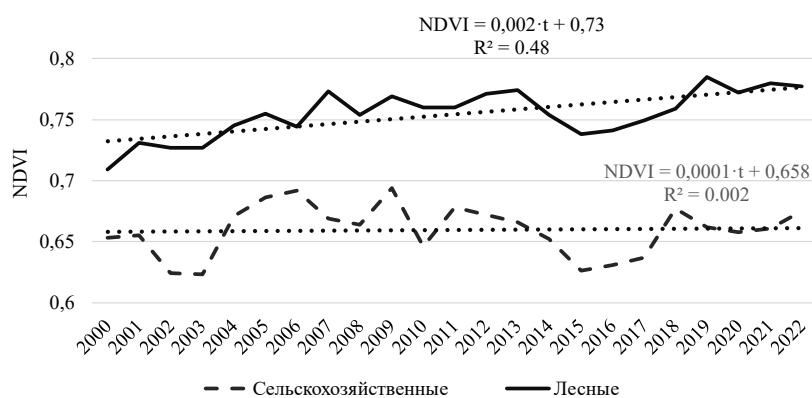


Рис. 1. Многолетние изменения величины NDVI в полесских ландшафтах
Fig. 1. Long-term NDVI changes in Polesia landscapes

Таблица 1. Структура землепользования в ландшафтах Полесья в 2000 и 2022 гг. (% от общей площади)
Table 1. The structure of land use in the landscapes of Polesie in 2000 and 2022 (% of total area)

Типы земель Land use/land cover	Сельскохозяйственные ландшафты Agricultural landscapes		Лесные ландшафты Forest landscapes	
	2000	2022	2000	2022
Леса Forests	15.5	15.2	61.9	62.2
Луга, кустарники, болота Meadows, bushes, swamps	9.1	9.2	18.5	17.7
Обрабатываемые земли Arable lands	64.4	64.5	17.5	18.0
Водоемы Reservoirs	0.2	0.2	0.1	0.1
Застроенные и нарушенные земли Built-up and disturbed lands	10.8	10.9	2.0	2.0

удельные площади типов земель на двух временных срезах: 2000 и 2022 г. В сельскохозяйственных ландшафтах за рассматриваемый период на 0.3% снизилась удельная площадь лесов и соответственно увеличились удельные площади обрабатываемых земель – на 0.1%, застроенных и нарушенных земель – на 0.1%, лугов, кустарников и болот – на 0.1%. В лесных ландшафтах удельная площадь лесов увеличилась на 0.3%, удельная площадь обрабатываемых земель – на 0.5%, площадь лугов, кустарников и болот, напротив, снизилась на 0.8%. Изменения удельных площадей других типов земель не превышали 0.05% (табл. 1). Таким образом, существенных изменений структуры землепользования за рассматриваемый период не произошло, поэтому влиянием данного фактора на динамику NDVI можно пренебречь.

В регионе за последние 20–25 лет по сравнению с периодом 1881–1990 гг. средние температуры января и февраля выросли на 2.5 °C, марта – на

Таблица 2. Корреляция NDVI ландшафтов Полесья с климатическими показателями
Table 2. Correlation of NDVI landscapes of Polesia with climatic parameters

Климатические показатели Climate indicators	Сельскохозяйственные ландшафты Agricultural landscapes	Лесные ландшафты Forest landscapes
Среднегодовая температура, °C Average annual temperature, °C	-0.14	0.15
Годовое количество осадков, мм Annual precipitation, mm	0.09	0.02
Средняя температура лета, °C Average summer temperature, °C	-0.05	0.26
Летнее количество осадков, мм Summer precipitation, mm	0.27	0.04

Примечание: жирным шрифтом отмечены статистически достоверные значения коэффициентов корреляции Спирмена.

Note: Statistically significant values of Spearman's correlation coefficients are marked in bold.

2.0 °C, июля и августа – на 1.3–1.4 °C. Годовая сумма активных температур (выше 10 °C) в 2006–2013 гг. практически на всей исследуемой территории превысила 2600 градусов, в связи с чем была выделена новая агроклиматическая зона (Мельник и др., 2018; Данилович и др., 2020). Можно предположить, что наблюдаемая динамика NDVI обусловлена этими климатическими изменениями.

Однако, корреляция между изученными климатическими показателями и NDVI сельскохозяйственных ландшафтов оказалась статистически недостоверна, за исключением положительной корреляции с летними осадками (табл. 2). Повышение температуры при незначительном изменении

осадков ведет к снижению влагообеспеченности и, соответственно, к ухудшению условий роста сельскохозяйственных культур (Мельник и др., 2018). В сельскохозяйственных ландшафтах Полесья, вероятно, этот механизм объясняет отсутствие положительного тренда NDVI.

Для сельскохозяйственных ландшафтов изменения климата имеют как положительные, так и отрицательные последствия. В число положительных последствий входят: более ранняя весна и более продолжительный вегетационный период, улучшение условий перезимовки сельскохозяйственных культур и сеянных многолетних трав, менее частые зимы с опасной для озимых культур температурой, более долгий безморозный период, смещение сроков сева яровых культур на более раннее время, продвижение на север зоны выращивания теплолюбивых культур и т.д. К отрицательным последствиям можно отнести:

увеличение частоты экстремальных и неблагоприятных метеорологических условий, увеличение частоты и интенсивности засух, рост пожарной опасности в прилегающих к полям лесах и на торфяниках, дефицит воды в вегетационный период, снижение уровня грунтовых вод, рост экстремальных осадков, появление новых вредителей и болезней растений и т.д. (Мельник и др., 2018; Данилович и др., 2020; Гусев, 2022а).

В лесных ландшафтах имеет место положительная корреляция NDVI с температурой (табл. 2), что, вероятно, является одной из причин положительного тренда NDVI, наблюдаемого в Полесье. Потепление положительно сказывается

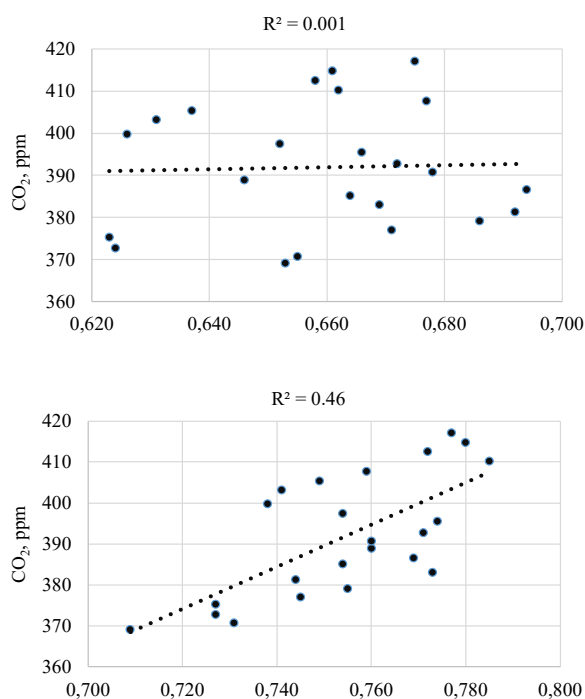


Рис. 2. Влияние роста содержания углекислого газа на величину NDVI в сельскохозяйственных (А) и лесных (В) ландшафтах

Fig. 2. Effect of increased carbon dioxide content on NDVI in agricultural (A) and forest (B) landscapes

на NDVI лесов за счет увеличения вегетационного периода, снижения риска повреждения деревьев морозами и снегопадами зимой.

Еще одним фактором, действие которого ведет к росту NDVI, является увеличение содержания CO_2 в атмосфере. Так, согласно проведенному на глобальном уровне моделированию, рост продуктивности растительности, наблюдаемый с 1980-х гг. (и соответственно значений NDVI), в значительной степени (до 70%) обусловлен увеличением концентрации CO_2 в атмосфере (Greening ..., 2016).

Анализ корреляционных связей между величиной NDVI лесных и сельскохозяйственных ландшафтов Белорусского Полесья и содержанием CO_2 в атмосфере показал следующее (рис. 2). В сельскохозяйственных ландшафтах связь между NDVI и изменениями концентрации углекислого газа отсутствует. В лесных ландшафтах NDVI положительно коррелирует с содержанием углекислого газа (рис. 2). Таким образом, положительное влияние роста концентрации CO_2 в атмосфере на фотосинтез, вероятно, имеет место (достоверно фиксируется) только в лесных ландшафтах. В сельскохозяйственных ландшафтах положительный эффект компенсируется негативными изменениями, связанными с увеличением засушливости климата в регионе (рост темпера-

тур при незначительных колебаниях количества осадков).

Таким образом, реакции сельскохозяйственных и лесных ландшафтов на климатические изменения и рост содержания CO_2 в атмосфере существенно отличаются. Установленные закономерности следует учитывать при прогнозировании и разработке соответствующих адаптационных мероприятий (Гусев, 2022а).

Заключение

Таким образом, в ходе выполненных исследований восточной части Белорусского Полесья установлено:

1) в лесных ландшафтах региона имеет место статистически значимый положительный тренд NDVI, в сельскохозяйственных ландшафтах подобный тренд отсутствует;

2) существенных изменений структуры землепользования за рассматриваемый период не произошло, что позволяет считать влияние данного фактора на динамику NDVI незначительным;

3) установлена положительная корреляция NDVI сельскохозяйственных ландшафтов с летними осадками (коэффициент корреляции 0.27); NDVI лесных ландшафтов положительно коррелирует со среднегодовой и летней температурами (коэффициенты корреляции, соответственно, 0.15 и 0.26);

4) установлена положительная корреляция NDVI лесных ландшафтов с содержанием CO_2 в атмосфере; в сельскохозяйственных ландшафтах корреляция NDVI с содержанием CO_2 отсутствует.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Х23КИ-022).

Список литературы

1. Гусев А.П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2020. №1. С. 101–107. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>.
2. Гусев А.П. NDVI как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси) // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46, №2. С. 200–209. doi: 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209.
3. Гусев А.П. Оценка риска негативных климатогенных реакций полесских ландшафтов // Российский журнал прикладной экологии. 2022а. №4. С. 13–19. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.13.19>.
4. Данилович И.С., Мельник В.И., Гейер Б. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причина, следствия, прогнозы // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2020. №1. С. 3–13.

<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>.

5. Дронин Н.М., Тельнова Н.О., Калущкова Н.Н. Анализ многолетних трендов продуктивности агроландшафтов юга Восточной Европы по материалам дистанционного зондирования // Геополитика и геоэкодинамика регионов. 2014. Т. 10, №1. С. 529–538.

6. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение. Минск: БГУ, 2007. 206 с.

7. Мельник В.И., Данилович И.С., Кулешова И.Ю., Комаровская Е.В., Мельчакова Н.В. Оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за период 1989–2015 гг. // Природные ресурсы. 2018. №2. С. 88–101.

8. Box E.O., Holben B.N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux // Vegetatio. 1989. Vol. 80. P. 71–89.

9. Gusev A.P. Impact of climate change on ecosystem productivity of the Belarusian Polesia according to remote data // Contemporary problems of ecology. 2022. Vol. 15, No 4. P. 345–352. doi: 10.1134/S1995425522040060.

10. Hao L., Kunxi L., Xiang Z., Jiacheng Z. Changes in vegetation greenness and their influencing factors in Southern China // Remote sensing. 2022. Vol. 14. P. 1–18. doi: 10.1134/S1995425522040060.

11. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations. Lund University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. 80 p.

References

1. Gusev A.P. Izmeneniya NDVI kak indikator dinamiki ekologicheskogo sostoyaniya landshaftov (na primere vostochnoy chasti Poles'skoy provintsii) [Changes in NDVI as an indicator of the dynamics of the ecological state of landscapes (on the example of the eastern part of the Poles'sky province)] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]. 2020. No 1. P. 101–107. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>.

2. Gusev A.P. NDVI kak indikator klimatogennykh reaktsiy geosistem (na primere yugo-vostoka Belarusi) [NDVI as an indicator of climatogenic responses of geosystems (on the example of the southeast of Belarus)] // Regional'nyye geosistemy [Regional geosystems]. 2022. Vol. 46, No 2. P. 200–209. doi: 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209.

3. Gusev A.P. Otsenka riska negativnykh klimatogennykh reaktsiy poles'skikh landshaftov [Assessing the risk of negative climatogenic reactions in Polesia landscapes] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022a. No 4. P. 13–19. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.13.19>.

4. Danilovich I.S., Melnik V.I., Geyer B. Modern climate changes in the Belarusian Polesie: cause, consequences, forecasts [Sovremennyye izmeneniya klimata Belorusskogo Poles'ya: prichina, sledstviya, prognozy] // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya [Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology]. 2020. No 1. P. 3–13. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>.

5. Dronin N.M., Telnova N.O., Kalutskova N.N. Analiz mnogoletnikh trendov produktivnosti agrolandschaftov

yuga Vostochnoy Yevropy po materialam distantsionnogo zondirovaniya [Analysis of long-term trends in the productivity of agricultural landscapes in the south of Eastern Europe based on remote sensing data] // Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2014. Vol. 10, No 1. P. 529–538.

6. Martsinkevich G.I. Landshtafovedeniye [Landscape science]. Minsk: BSU, 2007. 206 p.

7. Melnik V.I., Danilovich I.S., Kuleshova I.Yu., Komarovskaya E.V., Melchakova N.V. Otsenka agroklimaticheskikh resursov territorii Belarusi za period 1989–2015 gg. [Assessment of agroclimatic resources of the territory of Belarus for the period 1989–2015] // Prirodnyye resursy [Natural resources]. 2018. No 2. P. 88–101.

8. Box E.O., Holben B.N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux // Vegetatio. 1989. Vol. 80. P. 71–89.

9. Gusev A.P. Impact of climate change on ecosystem productivity of the Belarusian Polesia according to remote data // Contemporary problems of ecology. 2022. Vol. 15, No 4. P. 345–352. doi: 10.1134/S1995425522040060.

10. Hao L., Kunxi L., Xiang Z., Jiacheng Z. Changes in vegetation greenness and their influencing factors in Southern China // Remote sensing. 2022. Vol. 14. P. 1–18. doi: 10.1134/S1995425522040060.

11. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations. Lund University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. 80 p.

Gusev A.P. Productivity trends of agricultural and forest landscapes in Belarussian Polesia in 2000–2022 (according to the MODIS Terra Data).

The purpose of this work is to analyze the long-term dynamics of NDVI in agricultural and forest landscapes of the Belarusian Polesia as a response to global changes). Changes in climate and land use in test areas in 2000–2022 were studied. An analysis and assessment of the statistical significance of NDVI trends in agricultural and forest landscapes were carried out. A positive correlation of NDVI of agricultural landscapes with summer precipitation was found (correlation coefficient 0.27); NDVI of forest landscapes is positively correlated with mean annual and summer temperatures (correlation coefficients are 0.15 and 0.26, respectively). A positive correlation has been established between the NDVI of forest landscapes and the content of CO₂ in the atmosphere; in agricultural landscapes, there is no correlation between NDVI and CO₂ content.

Keywords: landscape; NDVI; trend; MODIS; climate change; Belarusian Polesia.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 28.08.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 08.09.2023

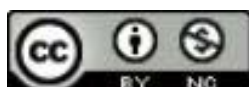
Принята к публикации / Accepted for publication: 15.09.2023

Информация об авторах

Гусев Андрей Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, декан геолого-географического факультета, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104, E-mail: andi_gusev@mail.ru.

Information about the authors

Andrei P. Gusev, Ph.D. in Geology, Associate Professor, Dean, F. Skorina Gomel State University, 104, Sovetskaya str., Gomel, 246019, Belarus, E-mail: andi_gusev@mail.ru.



И.И. Зиганшин, Д.В. Иванов, Р.Р. Хасанов, А.Б. Александрова
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, water-rf@mail.ru

МОНИТОРИНГ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ОЗЕР ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

В статье представлены результаты морфометрического анализа особо охраняемых озер, расположенных на территории Предволжья Республики Татарстан. В качестве основных материалов для анализа использовались топографические карты масштаба 1:100 000 издания 1939 г., планы озер масштаба 1:10000 1968–1969 гг., космические снимки высокого пространственного разрешения 1975–2022 г., а также данные полевых исследований озер 2021–2022 гг. Результаты анализа показывают, что среди исследуемых озер доминируют водоемы с площадью водного зеркала от 1 до 10 га. Сравнение разновременных картографических материалов за последние 85 лет позволило установить наличие общей тенденции к уменьшению площади акватории большинства озер, обусловленной как природными, так и антропогенными факторами.

Ключевые слова: антропогенное воздействие; озера; динамика морфометрических характеристик; мониторинг водных объектов; Республика Татарстан.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.34.41>

Введение

Система государственного мониторинга окружающей среды, включает организацию регулярных наблюдений за состоянием дна, берегов, состоянием и режимом использования водоохранных зон и изменениями морфометрических особенностей водных объектов (Приказ ..., 2014), включая озера. Морфометрические параметры озер (площадь водного зеркала, объем воды, средняя и максимальная глубины, длина и конфигурация береговой линии и др.), наряду с количественными и качественными характеристиками воды и донных отложений, служат важнейшими индикаторами природно-антропогенных изменений, происходящих как в самом водоеме, так и на его водосборе (Vörösmarty et al., 2000; Downing et al., 2006).

Небольшие по площади водного зеркала водоемы наиболее чувствительно реагируют на любые внешние воздействия ускорением процессов антропогенного эвтрофирования, увеличением площадей зарастания высшей водной растительностью, обмелением и иными негативными проявлениями (Антропогенное ..., 1980; Jorgensen, 2005). Подобного рода процессы характерны и для большинства озер Республики Татарстан (Тайсин, 2006; Зиганшин, Иванов, Хасанов, 2017, 2018, 2021). Задача организации государственного мониторинга морфометрических особенностей водных объектов на региональном уровне до настоящего времени не решена в силу объектив-

ных причин. В этой связи оценка современного состояния, а также динамики изменений основных морфометрических особенностей озер региона представляет несомненный научный интерес и практическую значимость.

Целью настоящего исследования является анализ изменений основных морфометрических параметров некоторых особо охраняемых озер, расположенных на территории Предволжья и включенных в «Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан», за период с 1939 по 2022 гг.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются 12 озер различного генезиса, входящие в систему особо охраняемых природных территорий регионального уровня и расположенные в границах физико-географического региона Предволжье Республики Татарстан (рис. 1, 2).

Современные морфометрические характеристики озер даны по результатам батиметрических съемок 2021–2022 г. Вычисление морфометрических показателей и построение батиметрических карт озер осуществляли в программном пакете Mapinfo Pro 16.0.

Базовым материалом для анализа динамики морфометрических параметров озер служили топографические карты масштаба 1:100000 1939 г., планы (выкопировки) озер 1:10000 1968–1969 гг. из архива Института проблем экологии и не-



Рис. 1. Карта расположения исследуемых озер
Fig. 1. Location of the studied lakes

дропользования АН РТ, а также космические снимки высокого пространственного разрешения 1975–2022 гг.

Результаты и их обсуждение

По современным оценкам (Водные объекты ..., 2018), на территории Предволжья Республики Татарстан насчитывается 970 озер различного генезиса. Шесть из них имеют статус памятников природы регионального значения: Большое, Карамольское (Байкуль), Лесное, Озеро, Провальное, Собакино. По морфометрическим характеристикам этих водоемов имеется достаточно большой ретроспективный материал (Озера ..., 1976; Государственный ..., 2007; Иванов и др., 2016; Зиганшин, Иванов, Хасанов, 2018). Три озера территориально входят в состав памятников природы регионального значения (Поймы рек Свияги и Кубни, Старица Свияги, Озерный комплекс у п. Новое Патрикеево); еще три водоема – озера Агишевское, Боковое и Клюквенное – расположены на территории государственного природного заказника регионального значения комплексного профиля «Свияжский».

Современные морфометрические характеристики озер представлены в таблице 1.

Площадь исследуемых озер не превышает 1000 га, что позволяет отнести их к категории малых (ГОСТ Р 59054–2020). По классификации И.С. Захаренкова (1964) озера распределяются следующим образом: малые (10–100 га) – 3 озера; маленькие (1–10 га) – 5 озер; озёрки (0.1–1 га) – 4 озера. Наибольшие размеры отличают озера старичного (пойменного) типа, расположенные на территории озерного комплекса у п. Новое Патрикеево (Мемь), памятника природы «Старица Свияги» (Большое), а также в пойме Свияги и Кубни (Большое) (табл. 1).

Протяженность береговой линии озер варьирует от 60 м (Озеро) до 5.55 км (Большое – Старица Свияги).

Для карстовых озер характерна округлая форма котловины и слабая изрезанность береговой линии, для старичных озер – вытянутая форма и сильная извилистость берегов (табл. 2).

Максимальные из глубин приурочены к карстовым провалам в ложе озер соответствующего генезиса (Большое, Провальное) (рис. 3). В оз. Большое на территории памятника природы «Старица Свияги» отмечена не характерная для старичных озер глубина – более 7 м (рис. 3). Вероятно, она обусловлена образованием карстового провала непосредственно в старом русле р. Свияги.

Суффозионно-карстовые озера (Карамольское, Лесное) мелководны и имеют незначительные среднюю и максимальную глубины.

Небольшие и нетипичные для озер этого генезиса глубины характерны для карстовых озер Собакино и Озеро, находящихся в стадии активного зарастания.

Для большинства исследованных водоемов по результатам сравнительного анализа разновременных карт четко обозначился тренд к сокращению площади водного зеркала (табл. 3), что соответствует установленным ранее тенденциям в динамике морфометрических показателей озер Республики Татарстан (Зиганшин, Иванов, Хасанов, 2017, 2018, 2021). При этом наиболее значимые изменения затронули оз. Лесное. Его площадь за период с 1939 по 2022 гг. уменьшилась более чем в 8 раз (рис. 4, табл. 3). Распашка прибрежной зоны озера провоцирует активное заиливание озера и постепенное зарастание мелководной высшей водной растительностью. Значительное влияние на негативные изменения в состоянии водоема оказала вырубка лесов на водосборе. Ранее озеро было полностью окружено лиственным лесом, откуда в свое время и получило свое нынешнее название. Во время Великой Отечественной войны и в последующие десятилетия в связи с хо-



Рис. 2. Озера – объекты исследования
Fig. 2. Studied lakes

Таблица 1. Морфометрические характеристики озер
Table 1. Morphometric indicators of lakes

Озера Lakes	Генезис Genesis	Площадь, га Area, ha	Объем, тыс. м ³ Volume, th. m ³	Длина, м Length, m	Ширина, м Width, m		Глубина, м Depth, m	
					сред. mid.	макс. max.	сред. mid.	макс. max.
Агишевское	Старичное	5.8	44.6	1340	43	56	0.8	2.4
Большое	Карстовое	2.3	67.5	178	109	155	3.5	7.8
Большое (Поймы рек Свяги и Кубни)	Старичное	11.5	126.1	1709	78	140	0.9	2.1
Большое (Старица Свяги)	Старичное	12.1	358.9	2236	47	165	3.4	7.3
Боковое	Старичное	4.0	34.4	637	63	169	0.8	2.5
Карамольское	Суффозионно-карстовое	3.6	38.7	320	110	138	1.0	1.6
Клюквенное	Старичное	2.8	23.1	772	37	67	0.8	1.8
Лесное	Суффозионно-карстовое	0.2	1.8	107	39	67	0.4	1.0
Мемі	Старичное	24.3	214.3	2110	111	190	1.3	2.5
Озеро	Карстовое	0.03	0.5	29	18	23	1.0	2.5
Провальное	Карстовое	0.2	6.6	57	34	43	3.5	8.5
Собакино	Карстовое	0.1	2.7	57	27	35	1.7	3.0

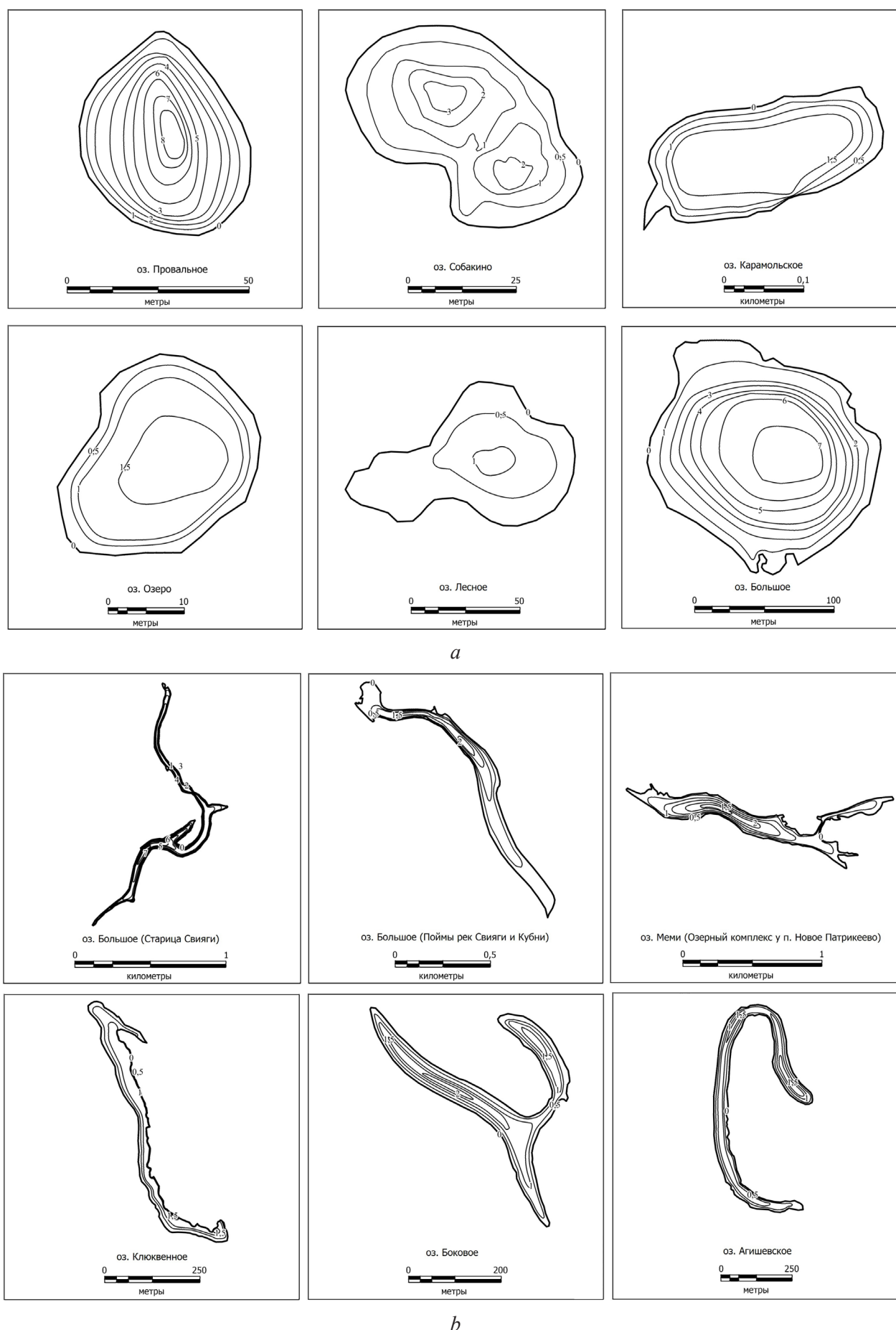


Рис. 3. Батиметрические карты карстовых и суффозионно-карстовых озер (а) и старичных (b) озер
 Fig. 3. Bathymetric maps of karst and suffusion-karst lakes (a) and oxbow lakes (b)

Таблица 2. Показатели удлиненности и изрезанности береговой линии озер
Table 2. Indicators of elongation and indentation of the lake coastline

Озера Lakes	Длина береговой линии, км Coastline length, km	Коэффициент изрезанности Rough coefficient	Коэффициент удлиненности Elongation coefficient
Агишевское	2.78	3.24	30.73
Большое	0.56	1.04	1.63
Большое (Поймы рек Свияги и Кубни)	3.59	2.49	21.91
Большое (Старица Свияги)	5.55	4.43	47.57
Боковое	1.95	2.74	10.09
Карамольское	0.84	1.21	2.91
Клюквенное	1.89	3.17	21.04
Лесное	0.25	1.09	2.74
Меми	4.76	2.60	19.01
Озеро	0.06	0.76	1.61
Провальное	0.17	1.05	1.68
Собакино	0.15	1.22	2.11

Таблица 3. Динамика площади водного зеркала озер
Table 3. Dynamics of the lake water surface area

Озера Lakes	Площадь, га Area, ha				Динамика (+/-), % Dynamics, (+/-), %				
	1939	1969	2002	2022	1939- 1969	1969- 2002	2002- 2022	1969- 2022	1939- 2022
Агишевское	7.4	6.6	6.2	5.8	-11	-6	-7	-12	-22
Большое	—*	1.8	2.0	2.3	—	+11	+15	+28	—
Большое (Поймы рек Свияги и Кубни)	14.9	12.5	12.2	11.5	-16	-2	-6	-8	-23
Большое (Старица Свияги)	20.7	15.2	14.2	12.1	-27	-7	-15	-20	-42
Боковое	7.2	5.1	4.4	4.0	-29	-14	-9	-22	-44
Карамольское	4.1	3.9	3.7	3.6	-5	-5	-3	-8	-12
Клюквенное	—	4.3	2.9	2.8	—	-33	-4	-35	—
Лесное	1.7	0.7	0.6	0.2	-59	-14	-67	-29	-88
Меми	29.9	27.8	25.5	24.3	-7	-8	-5	-13	-19
Озеро	—	0.20	0.08	0.03	—	-60	-63	-85	—
Провальное	0.3	0.27	0.24	0.20	-10	-11	-17	-26	-33
Собакино	0.2	0.17	0.14	0.11	-15	-18	-21	-35	-45

* прочерк означает отсутствие данных

* dash means no data

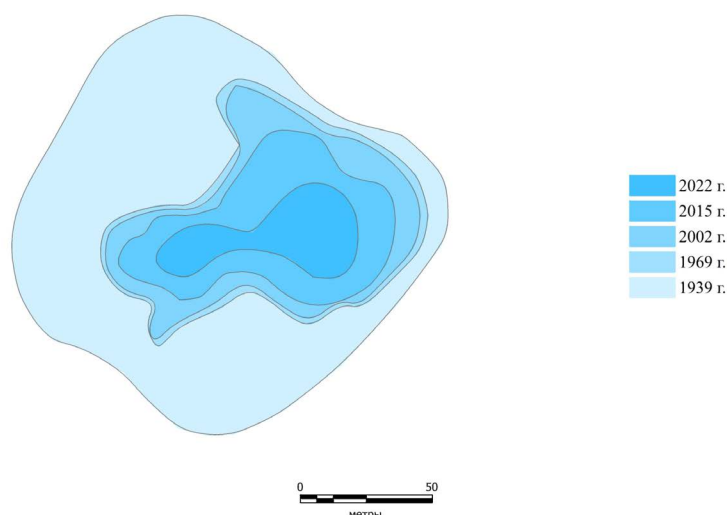


Рис. 4. Изменение площади акватории оз. Лесное с 1939 по 2022 гг.

Fig. 4. Changes in the water area of Lesnoye Lake from 1939 to 2022

зяйственной потребностью на территории Предволжья происходила масштабная вырубка лесов (в основном дубняков), которая в итоге привела к тому, что к концу 1980-х годов водосборная территория озера стала представлять собой полностью безлесное пространство.

Существенное сокращение площади акватории также характерно для карстового оз. Озеро, расположенного у с. Юматово Верхнеуслонского района, на старом московском («екатерининском») тракте. Этот уникальный водоем, известный по историческим хроникам с XVIII в., со времен прибытия Екатерины II в г. Казань (по преданию, в озеро упало оторвавшееся колесо кареты императрицы), за 50 лет уменьшился в площади более чем в семь раз (табл. 3). Уровень воды в нем критически упал в засушливое лето 2010 г. и до настоящего времени полностью не восстановился. Одна из причин – понижение уровня грунтовых вод, питающих водоем, в том числе в результате водозабора из артезианских скважин.

Как и озера водосборных территорий, пойменные озера-старицы также показали отрицательную динамику морфометрических показателей: за оцениваемый исторический период они потеряли от 19% до 44% своей водной поверхности (табл. 3). Основной причиной деградации озерных экосистем, расположенных в пойме Свияги и ее притоков, является сельскохозяйственная деятельность. Пойменные почвы, как правило, отличаются значительным уровнем плодородия. Их прибрежные зоны, в нарушение требований природоохранного законодательства, подвержены систематической распахке, причем в ряде случаев

она происходит практически под урез воды. Негативное воздействие на экологическое состояние пойменных озер оказывает их использование для водопоя крупного рогатого скота.

На фоне общей картины негативных изменений ряда морфометрических показателей озер, следует отметить и противоположную тенденцию, выражающуюся в заметном увеличении площади их акватории за анализируемый период. Так, площадь водного зеркала оз. Большое по сравнению с 1969 г. увеличилась на 28%, с 1.8 до 2.3 га (табл. 3), а максимальная глубина водоема выросла с 7.0 до 7.8 м. Причина наблюдаемых изменений видится в устойчивом характере подземного питания озера и продолжающихся процессах карстообразования в его ложе. В результате постоянного притока подземных вод, превышающего испарение с поверхности, в южной части озера сформировался небольшой ручей, отводящий избыток озерной воды в р. Черемшан.

Заключение

Сопоставление разновременных картографических материалов показало, что за последние 85 лет для большинства особо охраняемых озер, расположенных на территории Предволжья Республики Татарстан, была характерна тенденция к сокращению площади их акватории. Наиболее значительно сократилось от своих изначальных размеров оз. Лесное, утратившее почти 90% водного зеркала. Сохранение данного озера, как, впрочем, и многих других озер региона, требует принятия неотложных мер, направленных на предотвращение процесса его деградации. Для выявления и своевременного предупреждения таких негативных последствий антропогенного воздействия на озера как ухудшение качества их вод или полная потеря водности, необходимо, в дополнение к действующей региональной системе мониторинга качества вод по гидрохимическим показателям, сформировать аналогичную систему наблюдений за изменением их морфометрических характеристик, которая включала бы в себя необходимый комплекс наблюдений за динамикой состояния дна и берегов водных объектов, а также анализ всего спектра факторов, которые потенциально могут привести к ухудшению их экологического состояния.

Список литературы

1. Антропогенное воздействие на малые озера. Л.: Наука, 1980. 174 с.
2. Водные объекты Республики Татарстан: Гидрографический справочник. Казань: Фолиант, 2018. 512 с.
3. ГОСТ Р 59054–2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов.
4. Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан. Казань: Идел-Пресс, 2007. 407 с.
5. Захаренков И.С. О лимнологической классификации озер Белоруссии. Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики // Труды X научной конференции по внутренним водоемам Прибалтики. Минск: Наука и техника, 1964. С. 175–176.
6. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Динамика морфометрических показателей особо охраняемых водоемов Лаишевского района Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2017. №1. С. 38–43.
7. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Анализ динамики морфометрических показателей озер-памятников природы на территории Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2018. №2. С. 17–20.
8. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №1. С. 36–43. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039.
9. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В., Хасанов Р.Р. Характеристика процессов илонакопления в Собакинской системе озер // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. 2016. №5. С. 53–61.
10. Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.
11. Приказ Минприроды России от 08.10.2014 №432 «Об утверждении Методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части наблюдений за состоянием дна, берегов, состоянием и режимом использования водоохранных зон и изменениями морфометрических особенностей водных объектов или их частей».
12. Тайсин А.С. Озера Приказанского района, их современные природные и антропогенные изменения. Казань: Изд-во ТГГПУ, 2006. 167 с.
13. Downing J.A., Prairie Y.T., Cole J.J., Duarte C.M., Tranvik L.J., Striegl R.G., McDowell W.H., Kortelainen P., Caraco N.F., Melack J.M., Middelburg J.J. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // Limnology and oceanography. 2006. Vol. 51, iss. 5. P. 2388–2397. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>.
14. Vörösmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth // Science. 2000. 289. P. 284–288. doi: 10.1126/science.289.5477.284.
15. Jorgensen S.E., Löffle H., Rast W., Straskraba M. Lake and reservoir management. Amsterdam: Elsevier Science, 2005. 512 p.

References

1. Antropogennoe vozdejstvie na malye ozera [Anthropogenic impact on small lakes]. Leningrad: Nauka, 1980. 174 p.
2. Vodnye ob'ekty Respubliki Tatarstan: Gidrograficheskij spravocnik [Water bodies of the Republic of Tatarstan: Hydrographic Directory]. Kazan': Foliant, 2018. 512 p.
3. GOST R 59054–2020. Ohrana okruzhajushhej sredy. Pov-

erhnostnye i pozemnye vody. Klassifikacija vodnyh ob'ektov [Nature protection. Hydrosphere. Classification of water bodies].

4. Gosudarstvennyj reestr osobo ohranjaemyh prirodnyh territorij v Respublike Tatarstan [State register of specially protected natural areas in the Republic of Tatarstan]. Kazan': Idel-Press, 2007. 407 p.

5. Zaharenkov I.S. O limnologicheskoj klassifikacii ozer Belorussii. Biologicheskie osnovy rybnogo hozjajstva na vnutrennih vodoemah Pribaltiki [On the limnological classification of lakes in Belarus] // Tr. X nauch. konf. po vnutrennim vodoemam Pribaltiki [Proceedings of the tenth scientific conference on inland waters of the Baltic states]. Minsk: Nauka i tehnika, 1964. P. 175–176.

6. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Hasanov R.R. Dinamika morfometricheskikh pokazatelej osobo ohranjaemyh vodoemov Laishevskogo rajona Respubliki Tatarstan [Dynamics of morphometric parameters of protected lakes located in Laishevo district of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj jekologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2017. No 1. P. 38–43.

7. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Hasanov R.R. Analiz dinamiki morfometricheskikh pokazatelej ozer-pamyatnikov prirody na territorii Respubliki Tatarstan [Analysis of the dynamics of morphometric parameters of protected lakes of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj jekologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2018. No 2. P. 17–20.

8. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Hasanov R.R. Genезis i morfometricheskaja harakteristika ozer ohrannoј zony Saralinskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Genesis and morphometric characteristics of lakes in the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky reserve] // Rossijskij zhurnal prikladnoj jekologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2021. No 1. P. 36–43. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039.

9. Ivanov D.V., Ziganshin I.I., Osmelkin E.V., Hasanov R.R. Harakteristika processov ilonakoplenija v Sobakinskoј sisteme ozer [The characteristics of sedimentation processes in Sobakino lakes system] // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN Ser. Limnologija [Proceedings of the Karelian Research Centre, RAS. Limnology Series]. 2016. No 5. P. 53–61.

10. Ozera Srednego Povolzh'ja [Lakes of Middle Volga Region]. L.: Nauka, 1976. 236 s.

11. Prikaz Minprirody Rossii ot 08.10.2014 No 432 «Ob utverzhdenii Metodicheskikh ukazaniј po osushhestvleniju gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob'ektov v chasti nabljudenij za sostojaniem dna, beregov, sostojaniem i rezhimom ispol'zovaniја vodoohrannyh zon i izmenenijami morfometricheskikh osobennostej vodnyh ob'ektov ili ih chasteј» [Order of the Ministry for Environment protection and Natural Resources of the Russian Federation on 8.10.2014 No 432 «On approval of the Methodological Guidelines for the implementation of state monitoring of water bodies in terms of observations of the state of the bottom, banks, the state and mode of use of water protection zones and changes in the morphometric characteristics of water bodies or their parts»].

12. Tajsин A.S. Ozera Prikazanskogo rajona, ih sovremennye prirodnye i antropogennye izmenenija [Lakes of the Prikazansky region and their modern natural and anthropogenic changes]. Kazan', 2006. 167 p.

13. Downing J.A., Prairie Y.T., Cole J.J., Duarte C.M., Tranvik L.J., Striegl R.G., McDowell W.H., Kortelainen P., Caraco N.F., Melack J.M., Middelburg J.J. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // Limnology and oceanography. 2006. Vol. 51, iss. 5. P. 2388–2397. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>.

14. Vörösmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth // Science. 2000. 289. P. 284–288. doi:

10.1126/science.289.5477.284.

15. Jorgensen S.E., Löffle H., Rast W., Straskraba M. Lake and reservoir management. Amsterdam: Elsevier Science, 2005. 512 p.

Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Alexandrova A.B. **Monitoring of morphometric characteristics of specially protected lakes in the Pre-Volga region of the Republic of Tatarstan.**

The article presents the results of a morphometric analysis of specially protected lakes located on the territory of the Pre-Volga region of the Republic of Tatarstan. As a basis for morphometric analysis topographic maps at scale 1:100000 from 1939, large-scale plans at 1:10000 from 1968–1969, high resolu-

tion satellite images from 1975–2022, as well as field research data from 2021–2022 were used. The results of the analysis show that among the studied lakes, reservoirs with a water surface area from 1 to 10 hectares, with shallow and very shallow depths and a small volume of water mass dominate. The comparison of cartographic data from the last 85 years has shown that there is a common trend of decreasing the area of the water body for almost all specially protected lakes in the region. The most significant decrease in water surface area has been observed in Lesnoye Lake, losing about 90% of its water area.

Keywords: anthropogenic impact; lakes; dynamics of morphometric characteristics; monitoring; Republic of Tatarstan.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 30.06.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 13.07.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 27.07.2023

Информация о статье / Information about the article

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

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

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

Александрова Асель Биляловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: adabl@mail.ru.

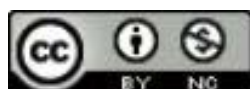
Information about the authors

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

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

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

Asel B. Alexandrova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: adabl@mail.ru.



^{1,2}Р.А. Шагидуллина, ²О.В. Никитин, ²Р.Н. Сабанаев, ^{1,2}В.З. Латыпова

¹Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Raisa.Shagidullina@tatar.ru

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, olnova@mail.ru

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИРОДООХРАННОГО И ВОДНОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ПОСТУПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА В ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

В статье приводится обзор требований природоохранного и водного законодательства по вопросам регулирования поступления поверхностного стока в водные объекты с учетом требований Федерального закона от 21.07.2014 г. №219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды», а также оценка соответствия этим требованиям системы отведения ливневых стоков г. Казани. Обоснована необходимость соблюдения природоохранного и водного законодательства при отведении поверхностных сточных вод промышленных и урбанизированных территорий, а также совершенствования законодательства для снижения нагрузки на внутригородские водоемы.

Ключевые слова: поверхностный сток; селитебные территории; сточные воды; качество вод; нормативы допустимых сбросов.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.42.48>

Введение

Поверхностный сток с селитебных территорий и площадок промышленных предприятий, поступающий в водные объекты, оказывает существенную антропогенную нагрузку на них. Основной объем стока поступает в водные объекты без очистки, а имеющиеся на ряде производственных объектов сооружения по очистке ливневых вод эксплуатируются недостаточно эффективно в связи с их физической изношенностью. Загрязнение водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, а также рыбохозяйственного значения в результате сброса неочищенных поверхностных сточных вод приводит к нарушению качества вод, снижению их самоочищающей способности и санитарно-экологического состояния, создавая угрозу экологической безопасности территорий.

Цель работы – обобщить требования законодательства Российской Федерации в части регулирования поступления поверхностного стока в водные объекты с промышленно-урбанизированных территорий и оценить соответствие эксплуатации ливневой канализации этим требованиям на примере г. Казани.

Результаты и их обсуждение

Анализ требований природоохранного и водного законодательства по вопросам отведения поверхностных сточных вод в водные объекты

проведен с учетом вступивших к настоящему времени в силу положений Федерального закона от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Правом каждого человека, в соответствии со ст. 42 Конституции РФ, является право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением. Для обеспечения этого фундаментального права предусмотрены охрана окружающей среды и обеспечение экологической безопасности. Согласно ст. 1 Федерального закона №7-ФЗ, «охрана окружающей среды (природоохранная деятельность)» – это деятельность органов государственной власти РФ, органов государственной власти субъектов РФ, органов местного самоуправления, общественных объединений и некоммерческих организаций, юридических и физических лиц, направленная на сохранение и восстановление природной среды, рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов, предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и ликвидацию ее последствий. Согласно указанной статье, экологическая безопасность – это состояние защищенности природной среды и жизненно важ-

ных интересов человека от возможного негативного воздействия какой-либо деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий.

Основными принципами охраны окружающей среды (ст. 3 №7–ФЗ) являются: соблюдение права человека на благоприятную окружающую среду; обеспечение благоприятных условий жизнедеятельности человека; охрана, воспроизводство и рациональное использование природных ресурсов как необходимые условия обеспечения благоприятной окружающей среды и экологической безопасности; ответственность органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления за обеспечение благоприятной окружающей среды и экологической безопасности на соответствующих территориях. В соответствии с ч. 2 ст. 34 вышеуказанного закона, к общим требованиям при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, которая оказывает или может оказывать прямое или косвенное негативное воздействие на окружающую среду относится проведение мероприятий по охране окружающей среды, в том числе по сохранению и восстановлению природной среды, рациональному использованию природных ресурсов, обеспечению экологической безопасности, предотвращению негативного воздействия на окружающую среду и ликвидации последствий такой деятельности.

Использование водных объектов для целей сброса сточных вод должно осуществляться с соблюдением требований, предусмотренных законодательством в области охраны окружающей среды (№7–ФЗ) и водным законодательством (Водный кодекс РФ, 2006).

Под сточными водами, в соответствии с п. 19 ст. 1 Водного кодекса РФ, понимаются: дождевые, талые, инфильтрационные, поливомоечные, дренажные воды, сточные воды централизованной системы водоотведения и другие воды, отведение (сброс) которых в водные объекты осуществляется после их использования или сток которых осуществляется с водосборной площади.

Основные принципы водного законодательства РФ (ст. 3 Водного кодекса РФ) включают: значимость водных объектов в качестве основы жизни и деятельности человека; приоритет охраны водных объектов перед их использованием, а также то, что использование водных объектов не должно оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Регулирование водных отношений осуществляется, исходя из представления о водном объекте как о важнейшей составной ча-

сти окружающей среды, среде обитания объектов животного и растительного мира, в том числе водных биологических ресурсов.

К числу запрещающих мер при эксплуатации водохозяйственных систем (п. 1 ч. 6 ст. 60 Водного кодекса РФ) относится запрет на сброс в водные объекты сточных вод, не подвергшихся санитарной очистке, обезвреживанию (исходя из недопустимости превышения нормативов допустимого воздействия на водные объекты и нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водных объектах).

Поддержание поверхностных вод в состоянии, соответствующем требованиям законодательства, обеспечивается путем установления и соблюдения нормативов допустимого воздействия (НДВ) на водные объекты (ст. 35 Водного кодекса РФ).

Санитарно-эпидемиологическими требованиями к водным объектам, установленными Федеральным законом «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (1999) определено, что водные объекты, используемые в целях питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также в рекреационных целях, в том числе водные объекты, расположенные в границах городских и сельских населенных пунктов, не должны являться источниками биологических, химических и физических факторов вредного воздействия на человека (ст. 18, п.1). Согласно п. 4 ст. 18 закона, для охраны водных объектов, предотвращения их загрязнения и засорения устанавливаются согласованные с органами, осуществляющими государственный санитарно-эпидемиологический надзор, нормативы предельно допустимых вредных воздействий на водные объекты, нормативы предельно допустимых сбросов химических, биологических веществ и микроорганизмов в водные объекты.

Согласно СанПиН 2.1.3684–21, качество воды поверхностных и подземных водных объектов, используемых для водопользования населения, должно соответствовать гигиеническим нормативам в зависимости от вида использования водных объектов или их участков: в качестве источника питьевого и хозяйственно-бытового водопользования, для рекреационного водопользования. В случае несоответствия гигиеническим нормативам качества воды водных объектов, используемых для целей питьевого водоснабжения населения, должна применяться водоподготовка, обеспечивающая качество и безопасность питьевой воды в распределительной сети в соответствии с гигиеническими нормативами (п. 91 раздела V СанПиН 2.1.3684–21). В водные объекты, на поверхность ледяного покрова поверхностных во-

дных объектов и водосборную территорию не допускается сбрасывать: сточные воды всех видов, содержащие возбудителей инфекционных заболеваний бактериальной, вирусной и паразитарной природы в количествах выше гигиенических нормативов; сточные воды, содержащие вещества (или продукты их трансформации), для которых не установлены гигиенические нормативы и отсутствуют методы их определения; пульпу, снег; отходы; нефтепродукты и нефтесодержащие воды (п. 92 раздела V СанПиН 2.1.3684–21).

Статьей 4.2 Федерального закона №7-ФЗ определено, что объекты, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду, в зависимости от уровня такого воздействия подразделяются на четыре категории:

- объекты, оказывающие значительное негативное воздействие на окружающую среду и относящиеся к областям применения наилучших доступных технологий, – объекты I категории;
- объекты, оказывающие умеренное негативное воздействие на окружающую среду, – объекты II категории;
- объекты, оказывающие незначительное негативное воздействие на окружающую среду, – объекты III категории;
- объекты, оказывающие минимальное негативное воздействие на окружающую среду, – объекты IV категории.

При установлении критериев, на основании которых осуществляется отнесение объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к соответствующей категории, учитываются, в том числе, уровни воздействия на окружающую среду видов хозяйственной деятельности; уровень токсичности, канцерогенные и мутагенные свойства загрязняющих веществ, содержащихся в сбросах загрязняющих веществ. Критерии, на основании которых осуществляется отнесение объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий, устанавливаются Правительством Российской Федерации (Постановление Правительства РФ №2398 от 31.12.2020). Присвоение объекту, оказывающему негативное воздействие на окружающую среду, соответствующей категории осуществляется при его постановке на государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

В соответствии со ст. 19 Федерального закона №7-ФЗ, в целях государственного регулирования, гарантирующего сохранение благоприятной окружающей среды и обеспечение экологической безопасности хозяйственной деятельности, для

предотвращения и снижения ее негативного воздействия на окружающую среду осуществляется нормирование в области охраны окружающей среды. Нормирование в области охраны окружающей среды заключается в установлении нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при осуществлении какой-либо деятельности.

Согласно ст. 21 Федерального закона №7-ФЗ, в целях предотвращения негативного воздействия на окружающую среду устанавливаются нормативы допустимых сбросов, относящиеся к нормативам допустимого воздействия на окружающую среду. Статьей 22 определено, что нормативы допустимых сбросов определяются для стационарного источника и (или) совокупности стационарных источников в отношении загрязняющих веществ, включенных в перечень загрязняющих веществ, установленный Правительством РФ (Распоряжение Правительства РФ №1316-р от 8.07.2015), расчетным путем на основе нормативов качества окружающей среды, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций, с учетом фоновое состояние компонентов природной среды. Согласно положениям статей 22, 31.1, 31.2 Федерального закона №7-ФЗ, для объектов I и III категорий нормативы допустимых сбросов разрабатываются для веществ I и II классов опасности.

Согласно ст. 23.1 Федерального закона №7-ФЗ, при невозможности соблюдения нормативов допустимых сбросов действующим стационарным источником или совокупностью таких источников, расположенных на объекте, оказывающем негативное воздействие на окружающую среду, устанавливаются временно разрешенные сбросы. Временно разрешенные сбросы устанавливаются на период выполнения плана мероприятий по охране окружающей среды или реализации программы повышения экологической эффективности в соответствии с графиком достижения нормативов сбросов.

Анализ вопросов соблюдения требований природоохранного законодательства при эксплуатации систем отведения поверхностных сточных вод на примере территории г. Казани.

Организованное отведение поверхностных сточных вод с территории г. Казани осуществляется в основном в следующие водные объекты: Куйбышевское водохранилище (р. Волгу), р. Казанку, р. Ноксу, озера Верхний Кабан, Нижний Кабан, Средний Кабан, озеро в парке Победы и протоку Булак. Объемы организованного сброса поверхностных сточных вод с территории г. Казани, в составе которых основными загрязняющими

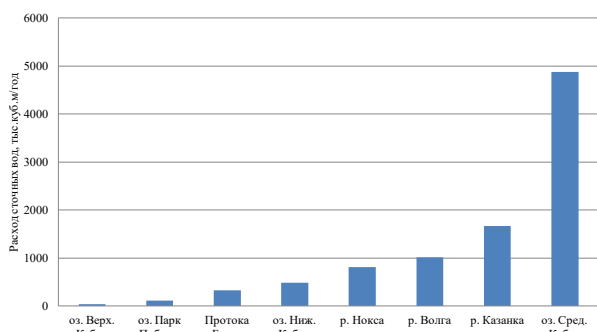


Рис. Нагрузка на водные объекты, оцениваемая по расходу поверхностных сточных вод с территории г. Казани

Fig. Load on water bodies, estimated by the flow of surface wastewater from the territory of Kazan

веществами являются нефтепродукты и взвешенные вещества, приведены на рисунке (Никитин и др., 2015).

Первоочередной задачей для определения предусмотренного законодательством обязательного объема требований по необходимым мерам регулирования негативного воздействия на водные объекты источников организованного поступления поверхностных сточных вод является постановка на государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Постановка водных объектов на государственный учет проводится Федеральной службой по надзору в сфере природопользования на основе программно-технического обеспечения учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (ПТО УОНВОС). ПТО УОНВОС содержит сведения об объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, расположенных в пределах всей территории РФ.

В соответствии с критериями отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий, определенными постановлением Правительства РФ №2398 системы отведения поверхностных сточных вод в водные объекты должны быть отнесены к III категории.

Проведенный анализ данных, содержащихся в ПТО УОНВОС, показал, что по г. Казани на государственный учет поставлены всего три объекта отведения ливневых стоков с присвоением III категории: очистные сооружения ливневой канализации жилого комплекса по ул. Мира в пос. Дербышки; очистные сооружения ливневой канализации жилого комплекса «Лето» и очистные сооружения ливневой канализации жилого комплекса по ул. Умырзая на Мамадышском

тракте. Объекты, отводящие ливневые сточные воды с автодорог и иных территорий г. Казани, в ПТО УОНВОС не выявлены, что свидетельствует об отсутствии, в нарушение требований природоохранного законодательства РФ, присвоенных им категорий по воздействию на окружающую среду. Соответственно, для указанных объектов к настоящему времени не определен объем требований, касающихся обеспечения регулирования их воздействия на окружающую среду.

Для сравнения можно привести данные по ООО «Челныводоканал», осуществляющему водоотведение сточных вод, в том числе, поверхностных, с территории г. Набережные Челны, обеспечившему постановку в ПТО УОНВОС на государственный учет 30 объектов водоотведения, которым присвоена III категория.

Для III категории по воздействию на окружающую среду объектов, отводящих ливневые стоки в водные объекты, в соответствии с положениями Федерального закона №7-ФЗ должны быть разработаны нормативы допустимых сбросов для веществ I и II класса опасности, а также, в случае невозможности, установлены временно разрешенные сбросы на период выполнения плана мероприятий по охране окружающей среды до достижения нормативов допустимых сбросов.

Следствием отсутствия учета объектов негативного воздействия в ПТО УОНВОС является непредставление в уполномоченные государственные органы предусмотренных законодательством РФ, включая приказ МПР РФ №109 (2022), отчетов об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля. Указанные отчеты содержат (Приказ Минприроды России №261 от 4.06.2018) такие важные для обеспечения охраны водных объектов сведения, как: сведения о результатах учета объема сброса сточных вод, их качества; сведения о результатах наблюдения за водными объектами (их морфометрическими особенностями) и их водоохранными зонами, а также о результатах учета качества поверхностных вод в местах сброса сточных вод выше и ниже мест сброса (в фоновом и контрольном створах); результаты проведения проверок работы очистных сооружений, включая результаты технологического контроля эффективности работы очистных сооружений на всех этапах и стадиях очистки сточных вод.

Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, определен распоряжением Правительства РФ №1316-р от 8.07.2015. Анализ источников, содержащих информацию о перечне загрязняю-

Таблица. Показатели качества воды, включая предельно допустимые концентрации и классы опасности загрязняющих веществ в водных объектах рыбохозяйственного значения и водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования

Table. Water quality indicators, including maximum permissible concentrations and hazard classes of pollutants in water bodies of fishery significance (MPC_{fs}) and water bodies for household drinking and cultural household use (MPC_{dc})

Загрязняющие вещества Pollutants	ПДК _{р/х} , мг/дм ³ MPC _{fs} , mg/dm ³	Класс опасности Hazard class	ПДК _{к/б} , мг/дм ³ MPC _{dc} , mg/dm ³	Класс опасности Hazard class
Нефтепродукты	0.05	3	0.1*	—
Взвешенные вещества	10.0	4	не нормируется	
ХПК, мгО ₂ /л	не нормируется		не более 3.0*	—
БПК ₅ , мгО ₂ /л	2.1*	—	—	—
Хлорид-анион	300	4	350	4
Кальций	180	4	не нормируется	
Препарат «Кама-М» – противогололедная смесь	5.0	3	не нормируется	

* приведены обобщенные показатели качества воды
generalized indicators of water quality are given

щих веществ, содержащихся в ливневых стоках, в частности, электронной версии журнала «Справочник эколога», показал, что, кроме нефтепродуктов и взвешенных веществ, необходимо учитывать также наличие в стоках органических веществ по показателям ХПК и БПК₅, а также минеральных солей.

В таблице приведены показатели качества воды, а также классы опасности загрязняющих веществ, установленные для водных объектов рыбохозяйственного значения и водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Показатели по минеральным солям приведены на примере кальция и хлоридов, а также используемой в РФ противогололедной смеси.

Исходя из величины классов опасности загрязняющих веществ, содержащихся в ливневых стоках, следует, что в рамках положений действующего природоохранного законодательства для объектов, осуществляющих организованное отведение данных сбросов в водные объекты разработка нормативов допустимых сбросов (НДС) не требуется. При этом именно разработка НДС позволяет оценить оказываемое на водные объекты воздействие, и, в случае необходимости, обеспечить установление временно разрешенных сбросов на период выполнения плана мероприятий по охране окружающей среды в соответствии с графиком достижения нормативов допустимых сбросов.

Анализ городских систем отведения поверхностных сточных вод в основные водные объек-

ты г. Казани выявил наличие при их эксплуатации таких нарушений требований природоохранного законодательства, как невыполнение требований по постановке объектов водоотведения на государственный учет с обеспечением присвоения им категории по негативному воздействию на окружающую среду с дальнейшим обеспечением организации соответствующих мер регулирования такого воздействия.

Для ряда водных объектов, например, озер Верхний Кабан, Нижний Кабан, Средний Кабан, озера в парке Победы и протоки Булак отсутствуют утвержденные Федеральным агентством водных ресурсов нормативы допустимого воздействия на водные объекты, установление и соблюдение которых, согласно ст. 35 Водного кодекса РФ, обеспечивает поддержание водных объектов в состоянии, соответствующем требованиям законодательства.

Также выявлено отсутствие подтверждения выполнения производственного экологического контроля в области охраны и использования водных объектов. При этом именно данные производственного экологического контроля являются основой для проведения корректной и достоверной инвентаризации сбросов загрязняющих веществ в водные объекты и определения платежной базы для исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду.

Проведенный анализ также показал необходимость внесения изменений в Федеральный закон № 7-ФЗ (2002) в части исключения ограничений, установленных как для объектов III, так и I ка-

тегории, по разработке нормативов допустимых сбросов только для веществ I, II класса опасности (по аналогии с объектами II категории).

Заключение

Таким образом, природоохранным и водным законодательством РФ для обеспечения охраны водных объектов и экологической безопасности территорий установлен запрет на сброс в водные объекты поверхностных сточных вод без очистки и обезвреживания, определена необходимость установления и соблюдения нормативов допустимого воздействия на водные объекты и нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в составе поверхностных сточных вод с территории поселений.

Основным направлением охраны поверхностных водных объектов селитебных территорий, являющимся основой для исключения в дальнейшем необходимости организации мер по восстановлению нарушенных водных объектов, является недопущение сброса неочищенных поверхностных сточных вод, установление и соблюдение нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ, поступающих с поверхностными сточными водами, а также организация и системное проведение производственного экологического контроля в области охраны и использования водных объектов.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 г. №74-ФЗ.
2. Никитин О.В., Латыпова В.З., Сабанаев Р.Н., Шагидуллина Р.А., Лукоянов Д.Е., Сафиуллин Р.М., Яковлева О.Г., Горшкова А.Т., Дмитриев А.А. О правовых аспектах эксплуатации систем отведения поверхностного стока с селитебных территорий в водные объекты // Российский журнал прикладной экологии. 2015. №3. С. 56–60.
3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
4. Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 г. №2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».
5. Приказ Минприроды России от 18.02.2022 г. №109 «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков предоставления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля».
6. Приказ Минприроды России от 14.06.2018 г. №261 «Об утверждении формы отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля».
7. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. №552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

ного значения».

8. Распоряжение Правительства РФ от 8.07.2015 г. №1316-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды».

9. Справочник эколога (https://www.profiz.ru/eco/4_2023/livnevka/) (дата обращения: 01.08.2023).

10. Федеральный закон от 10.01.2002 г. №7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

11. Федеральный закон от 30.03.1999 г. №52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

References

1. Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 03.06.2006 No 74-FZ [Water Code of the Russian Federation dated 03.06.2006 No 74-FZ].
2. Nikitin O.V., Latypova V.Z., Sabanayev R.N., Shagidullina R.A., Lukoyanov D.Ye., Safiullin R.M., Yakovleva O.G., Gorshkova A.T., Dmitriyev A.A. O pravovykh aspektakh ekspluatatsii sistem otvedeniya poverkhnostnogo stoka s selitebnykh territoriy v vodnyye ob'yekty [On the legal aspects of the operation of systems for diverting surface runoff from residential areas into water bodies] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2015. No 3. P. 56–60.
3. SanPiN 1.2.3685-21. Gигиенические нормативы i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans].
4. Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 31.12.2020 No 2398 «Ob utverzhdenii kriteriyev otneseniya ob'yektov, okazyvayushchikh negativnoye vozdeystviye na okruzhayushchuyu sredy, k ob'yektam I, II, III i IV kategoriy» [Decree of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No 2398 «On approval of the criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment as objects of categories I, II, III and IV»].
5. Prikaz Minprirody Rossii ot 18.02.2022 g. №109 «Ob utverzhdenii trebovaniy k soderzhaniyu programmy proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya, poryadka i srokov predostavleniya otcheta ob organizatsii i o rezul'tatakh osushchestvleniya proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya» [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 18.02.2022 No 109 «On approval of the requirements for the content of the industrial environmental control program, the procedure and deadlines for submitting a report on the organization and results of industrial environmental control»].
6. Prikaz Minprirody Rossii ot 14.06.2018 No 261 «Ob utverzhdenii formy otcheta ob organizatsii i o rezul'tatakh osushchestvleniya proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya» [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 14.06.2018 No. 261 «On approval of the form of a report on the organization and on the results of industrial environmental control»].
7. Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaystva RF ot 13.12.2016 No 552 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'yektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'yektov rybokhozyaystvennogo znacheniya» [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated 13.12.2016 No 552 «On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance»].
8. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 8.07.2015 №1316-р

«Ob utverzhdenii perechnya zagryaznyayushchikh veshchestv, v otnoshenii kotorykh primenyaetsya mery gosregulirovaniya v oblasti okhrany okruzhayushchey sredy» [Decree of the Government of the Russian Federation dated 8.07.2015 No 1316-r «On approval of the list of pollutants subject to state regulation measures in the field of environmental protection»].

9. Spravochnik ekolog [Ecologist's handbook] (https://www.profiz.ru/eco/4_2023/livnevka/). (accessed: 01.08.2023).

10. Federal'nyy zakon ot 10.01.2002 №7-FZ «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» [Federal Law dated 10.01.2002 No 7-FZ «On environmental protection»].

11. Federal'nyy zakon ot 30.03.1999 No 52-FZ «O sanitarno-epidemiologicheskoy blagopoluchii naseleniya». [Federal law dated 30.03.1999 No 52-FZ «On the sanitary and epidemiological welfare of the population»].

Shagidullina R.A., Nikitin O.V., Sabanaev R.N.,
Latypova V.Z. **Analysis of modern requirements of**

environmental and water legislation on regulation of the surface runoff flow into water bodies.

The article provides an overview of the requirements of environmental and water legislation on the regulation of surface runoff inflow into water bodies, taking into account the requirements of the Federal Law №219-FZ “On Amendments to the Federal Law “On Environmental Protection” with assessing the compliance with these requirements of the storm water disposal system using the example of the city of Kazan. The necessity of compliance with environmental and water legislation when discharging surface wastewater from industrialized urban areas, as well as improving legislation to reduce the load on intracity water bodies, is substantiated.

Keywords: surface runoff; residential areas; wastewater; water quality; allowable discharge standards.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 16.06.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 26.06.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.07.2023

Информация о статье / Information about the article

Шагидуллина Раиса Абдулловна, доктор химических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28; доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: Raisa.Shagidullina@tatar.ru.

Никитин Олег Владимирович, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: oleg.nikitin@kpfu.ru.

Сабанаев Руслан Николаевич, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: ruslans_90@mail.ru.

Латыпова Венера Зиннатовна, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент АН РТ, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18; ведущий научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: ecoanrt@yandex.ru.

Information about the authors

Raisa A. Shagidullina, D.Sci. in Chemistry, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28 Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia; Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: Raisa.Shagidullina@tatar.ru.

Oleg V. Nikitin, Ph.D. in Geography, Associate Professor, Head of Department, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: oleg.nikitin@kpfu.ru.

Ruslan N. Sabanaev, Engineer, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: ruslans_90@mail.ru.

Venera Z. Latypova, D.Sci. in Chemistry, Professor, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia; Leading Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: ecoanrt@yandex.ru.



*Р.А. Шагидуллина, А.Р. Шагидуллин, В.А. Нурмехамитова, А.А. Мусина,
А.Ф. Гилязова, Р.Р. Шагидуллин*

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Raisa.Shagidullina@tatar.ru

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТ ПО МОНИТОРИНГУ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН

В статье приводится обзор требований природоохранного законодательства Российской Федерации по вопросам мониторинга атмосферного воздуха с анализом проблем, касающихся организации эффективного его проведения. Сформулированы предложения по совершенствованию выполнения соответствующих работ в Республике Татарстан, представляющие актуальность для территории Российской Федерации в целом.

Ключевые слова: мониторинг атмосферного воздуха; загрязнение; объекты, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду; экологическая безопасность.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.49.55>

Введение

Согласно федеральному законодательству, мониторинг атмосферного воздуха проводится в целях наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха, комплексной оценки и прогноза его состояния, а также обеспечения органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций и населения текущей и экстренной информацией о загрязнении атмосферного воздуха.

Цель работы: обобщить требования законодательства Российской Федерации по вопросам проведения мониторинга атмосферного воздуха на государственном уровне и в рамках функционирования локальных систем наблюдений в районах расположения объектов, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду; оценить соответствие требованиям законодательства функционирующей в Республике Татарстан системы мониторинга атмосферного воздуха и подготовить предложения по повышению эффективности работ в данной области.

Результаты и их обсуждение

Анализ требований природоохранного законодательства Российской Федерации по вопросам проведения мониторинга атмосферного воздуха.

Атмосферный воздух является жизненно важным компонентом окружающей среды, неотъемлемой частью среды обитания человека, растений и животных. Федеральным законом от 4.05.1999 г. №96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха»,

устанавливающим правовые основы охраны атмосферного воздуха и направленным на реализацию конституционных прав граждан, вопросам проведения мониторинга атмосферного воздуха уделено отдельное внимание. Согласно ст. 23 указанного закона, Правительство РФ, органы государственной власти субъектов РФ организуют государственный мониторинг атмосферного воздуха, являющийся составной частью государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды), и в пределах своей компетенции обеспечивают его осуществление в целях наблюдений за загрязнением воздуха, комплексной оценки его состояния и обеспечения наличия текущей и экстренной информации о его загрязнении.

Статьей 63 Федерального закона от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» закреплено, что государственный экологический мониторинг осуществляется в рамках единой системы государственного экологического мониторинга федеральными органами исполнительной власти, органами государственной власти субъектов РФ в соответствии с их компетенцией, установленной законодательством России, посредством создания и обеспечения функционирования наблюдательных сетей и информационных ресурсов в рамках подсистем единой системы государственного экологического мониторинга.

Порядок осуществления государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды и формирования государственной системы наблюдений за состоянием окружающей среды



Рис. Структура государственной системы наблюдения за состоянием окружающей среды
Fig. The structure of the state system for monitoring environmental pollution

определен Постановлением Правительства РФ от 06.06.2013 №477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды». Согласно постановлению, система наблюдений включает в себя государственную наблюдательную сеть, формирование и функционирование которой обеспечивается Росгидрометом, а также территориальные системы наблюдений за состоянием окружающей среды, формирование и обеспечение функционирования которых осуществляется органами исполнительной власти субъектов РФ (рис.). При формировании государственной системы наблюдений учитываются пункты и системы наблюдений за состоянием окружающей среды в районах расположения объектов, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду, и владельцы которых в соответствии с федеральными законами осуществляют мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды в зоне воздействия этих объектов (локальные системы наблюдений).

В целях повышения эффективности системы мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды, в соответствии с постановлением Правительства РФ №477 и приказом Росгидромета от 02.02.2017 №23 была утверждена «Концепция совершенствования системы мониторинга загрязнения окружающей среды с учетом конкретизации задач федерального, регионального и локального уровней на 2017–2025 годы», одобренная Федеральным экологическим советом при Минприроды России (протокол от 07.10.2016 № 69/3-ФЭСпр).

При определении требований к формированию и функционированию государственной наблюдательной сети, территориальных и локальных систем наблюдений за загрязнением окружающей среды Концепция учитывает, что все они решают одну общую задачу – получение фактических данных об уровнях загрязнения окружающей среды. Существенными отличиями в деятельности

этих систем являются принципы размещения их пунктов (станций), а также выполняемых на них программ наблюдений, предусматривающие, что они должны обеспечивать получение фактических данных о загрязнении окружающей среды, в том числе загрязнения атмосферного воздуха:

- государственной наблюдательной сетью – для оценки загрязнения окружающей среды, обусловленного последствиями глобального и межрегионального воздействия выбросов загрязняющих веществ, а на крупных урбанизированных территориях – для оценки загрязнения характерными для них загрязняющими веществами;

- территориальными системами наблюдений – для оценки загрязнения окружающей среды, обусловленного последствиями регионального воздействия выбросов загрязняющих веществ, на крупных урбанизированных территориях – для оценки загрязнения специфическими для них загрязняющими веществами, на других урбанизированных территориях, где отсутствуют пункты государственной наблюдательной сети, в том числе в поселениях пунктах с численностью населения 100 тыс. человек и менее;

- локальными системами наблюдений – для оценки загрязнения окружающей среды, обусловленного воздействием выбросов загрязняющих веществ объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

При анализе вопросов развития и модернизации государственной наблюдательной сети Росгидромета в Концепции отмечено, что одной из основных проблем этой сети является низкий уровень технического оснащения, не отвечающий современным требованиям. Только на 7% пунктов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха осуществляется непрерывная регистрация 12% загрязняющих веществ от общего числа наблюдаемых примесей. Ограниченные ресурсы не позволяют организовать непрерывные измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе даже в наиболее загрязненных городах. Среди ожидаемых результатов реализации концепции совершенствования системы мониторинга к 2025 году указаны: обеспечение технического перевооружения и модернизации не менее 50% государственной наблюдательной сети Росгидромета до уровня, соответствующего международным стандартам; исключение дублирования работ, выполняемых государственной наблюдательной сетью, территориальными и локальными системами наблюдений; а также увеличение до 100% учреждений Росгидромета, размещающих на своих сайтах оперативную информацию о загрязнении окружающей среды.

Таблица. Размещение на территории Республики Татарстан АСКЗА и ПЭЛ, оснащенных автоматическими средствами измерений

Table. Monitoring stations with automatic measuring instruments on the territory of the Republic of Tatarstan

Размещение Placement	АСКЗА Stationary stations	ПЭЛ Mobile laboratories
Республика Татарстан, в том числе: Republic of Tatarstan, including:	17	6
г. Казань Kazan	5	2
г. Набережные Челны Naberezhnye Chelny	2	1
г. Нижнекамск Nizhnekamsk	4	1
г. Елабуга Yelabuga	1	
г. Азнакаево Aznakayevo	1	1
г. Менделеевск Mendeleevsk	1	
г. Альметьевск Almetyevsk		1
пгт. Нижняя Мактама и с. Калейкино Альметьевского м.р. Nizhnyaya Maktama and Kalejkino	2	
с. Большое Афанасово Нижнекамского м.р. Bol'shoe Afanasovo	1	

Анализ вопросов функционирования государственной системы наблюдений и локальных систем наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в Республике Татарстан

В городах Казань, Набережные Челны и Нижнекамск наблюдения за загрязнением атмосферы проводятся ФГБУ «УГМС Республики Татарстан» на стационарных постах ежедневно (кроме воскресных и праздничных дней) 4 раза в сутки (1, 7, 13, 19 ч.). В г. Казань установлены 10 пунктов наблюдений, в г. Набережные Челны – 5 пунктов, в г. Нижнекамск – 3. В г. Альметьевск наблюдения проводятся на трех маршрутных постах по неполной программе: ежедневно (кроме воскресных и праздничных дней) 3 раза в сутки (7, 13, 19 ч.). В г. Зеленодольск проводятся экспедиционные обследования загрязнения воздуха три раза в месяц с отбором проб воздуха по два раза в сутки.

Учитывая ожидаемые результаты реализации концепции совершенствования системы мониторинга в части обеспечения непрерывной регистрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, в том числе для обеспечения получения оперативной информации о загрязнении воздуха, а также принимая во внимание положения Переч-

ня поручений Председателя Правительства РФ от 26.04.2019 г. (ДМ-П9-3502), касающиеся необходимости увеличения в работе учреждений Росгидромета количества непрерывно действующих автоматических станций мониторинга за состоянием атмосферного воздуха для городов с численностью населения превышающей 100 тыс. человек, особую значимость в настоящее время имеет внедрение в работе ФГБУ «УГМС Республики Татарстан» автоматических средств измерений. Важным является также обеспечение соблюдения требований, установленных постановлением Правительства РФ от 17.03.2021 г. №392, в отношении охранных зон стационарных пунктов наблюдений, входящих в государственную наблюдательную сеть Росгидромета. В настоящее время размер такой зоны при проведении наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха составляет 100 м, при этом в границах таких зон установлен запрет на размещение стоянок автотранспорта, стационарных и передвижных источников загрязнения атмосферного воздуха.

Министерством экологии и природных ресурсов Республики Татарстан (МЭПР РТ), в соответствии со ст. 6 Федерального закона от 31.12.2005 №199-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с совершенствованием разграничения полномочий», с 01.01.2006 г. обеспечивается формирование и функционирование территориальной системы наблюдения за состоянием атмосферного воздуха (ТСН).

В настоящее время в рамках ТСН функционируют 17 автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха (АСКЗА) и 6 передвижных экологических лабораторий (ПЭЛ), позволяющих осуществлять непрерывный, круглосуточный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха (табл.).

При выборе мест размещения АСКЗА учитываются, в том числе, требования к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением, утвержденные приказом Минприроды России от 30.07.2020 г. №524, согласно которым приоритет при выборе мест размещения пунктов наблюдений имеют плотность проживания населения, специфика территории, а также места наиболее высокого загрязнения атмосферного воздуха, выделенные на основе натуральных

наблюдений или сводных расчетов загрязнения атмосферы.

Данные о концентрациях загрязняющих веществ фиксируются в автоматическом режиме каждые 20–40 минут. За 2022 г. на АСКЗА, число которых составляло в указанный период – 16, выполнено свыше 4407 тысяч анализов загрязняющих веществ. Одновременно с измерениями концентраций загрязняющих веществ выполнялось определение метеоусловий: температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра (Государственный ..., 2023).

Достоверность данных, получаемых на АСКЗА и ПЭЛ, обеспечивается выполнением требований федерального законодательства: используемая измерительная аппаратура внесена в Государственный реестр средств измерений РФ, поверяемых в установленном порядке; измерения проводятся по методикам измерений, внесенным в эксплуатационную документацию на средства измерений; методики измерений с использованием оборудования, установленного на АСКЗА и ПЭЛ, учтены в области аккредитации подведомственного МЭПР РТ ГБУ «НПО Геоцентр РТ», в оперативное управление которому переданы АСКЗА и ПЭЛ.

ГБУ «НПО Геоцентр РТ» получена лицензия на деятельность в области гидрометеорологии и смежных с ней областях (приказ Росгидромета от 17.06.2022 №260, лицензия № Л039-00117-77/00269037). Места осуществления лицензионной деятельности включают места установки АСКЗА. В целях выполнения требований к порядку предоставления информации лицензиатами, установленных приказом Минприроды России от 24.01.2022 г. №35, Департаментом Росгидромета по ПФО согласован порядок передачи информации в систему Росгидромета: данные, получаемые ГБУ «НПО Геоцентр РТ» в результате осуществления лицензионной деятельности, должны ежеквартально передаваться в ФГБУ «УГМС Республики Татарстан».

Особо важное значение имеет также то, что результаты непрерывных измерений передаются в режиме онлайн на ГИС «Экологическая карта Республики Татарстан», что позволяет эффективно визуализировать все результаты измерений, обеспечивать оперативное реагирование и организацию предупредительных мер для предотвращения превышений допустимого содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

В целом наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в рамках ТСН проводятся в 122 точках, в 105 из которых осуществляется ручной отбор проб с выполнением анализов загрязняющих

веществ в лабораторных подразделениях ГБУ «НПО Геоцентр РТ».

В отношении ТСН МЭПР РТ представляется наиболее важным обеспечение и в дальнейшем соответствия установленным требованиям к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением, а также обеспечение своевременной передачи в ФГБУ «УГМС Республики Татарстан» данных по итогам проводимых измерений в соответствии с согласованным Департаментом Росгидромета по ПФО порядком передачи информации в систему Росгидромета, в том числе для учета при проведении оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха на территории Республики Татарстан.

Как уже было отмечено выше, формирование государственной системы наблюдений должно основываться на данных локальных систем наблюдений. Функционированию таких систем предшествует реализация требований п. 3 ст. 23 Федерального закона №96-ФЗ (1999), касающихся установления территориальными органами Росприроднадзора совместно с территориальными органами Росгидромета перечня объектов, владельцы которых должны осуществлять мониторинг атмосферного воздуха. В дальнейшем владельцы объектов, включенных в данный перечень, обеспечивают проведение мониторинга атмосферного воздуха в рамках производственного контроля в области охраны окружающей среды (производственного экологического контроля). Согласно ст. 67 Федерального закона №7-ФЗ (2002) соответствующие работы, в том числе в области охраны атмосферного воздуха, проводятся в соответствии с Программой производственного экологического контроля (ПЭК), требования к содержанию которой, а также сроки представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля определены приказом Минприроды России от 18.02.2022 №109 «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля».

Отчеты об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля ежегодно предоставляются владельцами объектов через личный кабинет природопользователя в рамках созданного Росприроднадзором Программно-технического обеспечения учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (ПТО УОНВОС).

Принятый по Республике Татарстан перечень

объектов, владельцы которых должны осуществлять мониторинг атмосферного воздуха, включает в настоящее время 6296 объектов. Размещенный на сайте Росприроднадзора (https://rpn.gov.ru/regions/16/for_users/report/) перечень содержит, кроме наименований соответствующих объектов, данных об их размещении на территории Республики Татарстан, также коды этих объектов, присвоенные им при их государственной регистрации в ПТО УОНВОС, что позволяет получить в рамках указанного программно-технического обеспечения сведения по наличию либо по отсутствию для конкретного объекта программы ПЭК.

По итогам проведенного анализа перечня объектов, владельцы которых должны осуществлять мониторинг атмосферного воздуха на территории Республики Татарстан, представляется целесообразным сократить число объектов, включенных в него, путем исключения тех, влияние которых на загрязнение атмосферного воздуха минимально, либо полностью отсутствует. Так, например, в данный перечень включено значительное количество офисных помещений, сельских магазинов и клубов, зданий школ и ВУЗов, домов культуры, библиотек, почтамтов, баз отдыха, лечебно-профилактических учреждений, санаториев, жилых комплексов, гостиниц, магазинов, узлов электро-связи, аптек, фельдшерско-акушерских пунктов, жилых домов, кафе и ресторанов, артезианских скважин и т.п. Исключение таких объектов из вышеуказанного перечня позволит более эффективно провести работы, касающиеся учета данных локальных систем мониторинга для формирования и функционирования государственной системы наблюдений.

Наличие утвержденных программ ПЭК для объектов, владельцы которых должны осуществлять мониторинг атмосферного воздуха на территории Республики Татарстан, проанализировано в рамках данных ПТО УОНВОС на официальном сайте Росприроднадзора (Программно-техническое обеспечение..., 2023). Из 6296 объектов в данном перечне 216 определены объектами I категории, то есть отнесены природоохранным законодательством к объектам, оказывающим значительное воздействие на окружающую среду. При этом, согласно данным ПТО УОНВОС, из указанных 216 объектов у 132 из них (61%) отсутствуют утвержденные программы ПЭК, соответственно, не определен режим производственного контроля, включая, в том числе, режим проведения работ, касающихся мониторинга атмосферного воздуха. Отсутствие программ ПЭК характерно также для основной части объектов II

и III категорий, включенных в перечень объектов по Республике Татарстан.

Разработка программы ПЭК проводится природопользователями, включая владельцев объектов, в зоне влияния которых должен проводиться мониторинг атмосферного воздуха, в соответствии с положениями приказа Минприроды России №109 (2022). Согласно данному документу, программа ПЭК включает такие разделы как: сведения о подразделениях и (или) должностных лицах, отвечающих за осуществление производственного экологического контроля, сведения о периодичности и методах осуществления производственного экологического контроля, местах отбора проб и методиках (методах) измерений. Подраздел «Производственный контроль в области охраны атмосферного воздуха» должен содержать, кроме план-графика контроля стационарных источников выбросов, план-график проведения наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха с указанием измеряемых загрязняющих веществ, периодичности, мест и методов отбора проб, используемых методов и методик измерений; перечень нормативных документов, стандартов организации, регламентирующих требования к методам ПЭК. Указано, что план-график наблюдений должен содержать адреса (географические координаты) пунктов наблюдений с указанием номера каждого пункта наблюдения; перечень контролируемых на каждом пункте загрязняющих веществ; методы определения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе; периодичность отбора проб атмосферного воздуха. Требования по порядку корректного определения географических координат пунктов наблюдений с целью обеспечения контроля за влиянием объекта на окружающую среду; определения перечня загрязняющих веществ, подлежащих контролю и характеризующих влияние объекта на прилегающую территорию; определения необходимой периодичности отбора проб атмосферного воздуха в приказе Минприроды России № 109 не отражены. Также не учтено, что при мониторинге атмосферного воздуха в перечень необходимых измерений, кроме измерений концентраций загрязняющих веществ, должно быть в обязательном порядке включено определение метеорологических условий, при наступлении которых должны проводиться наблюдения. Следствием отсутствия указанной детализации необходимых работ будет однозначно являться неэффективное и неинформативное проведение наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в зоне влияния объектов.

Заключение

В целях проведения наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха, обеспечивающих корректную комплексную оценку его состояния, достаточных для обеспечения заинтересованных органов власти, организаций и населения необходимой информацией важное значение имеет как системное функционирование государственной системы наблюдений, так и обеспечение эффективного функционирования локальных систем наблюдений. Проведенный анализ показал необходимость включения в нормативно правовой акт Российской Федерации, регламентирующий выполнение работ по производственному экологическому контролю, дополнений, касающихся порядка организации работ по проведению наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в зоне размещения объектов, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду и владельцы которых в соответствии с федеральными законами осуществляют мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды в зоне их воздействия.

Список литературы

1. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2022 году. Казань: МЭПР РТ, 2023. 397 с.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 06.06.2013 № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды».
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 17.03.2021 г. №392 «Об утверждении Положения об охранной зоне стационарных пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением, о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 27.08.1999 г. №972 и признании не действующим на территории Российской Федерации постановления Совета Министров СССР от 6.01.1983 г. №19».
4. Программно-техническое обеспечение учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду // <https://rpn.gov.ru/about/informing/systems/uonvos/> (дата обращения: 01.08.2023)
5. Приказ Минприроды России от 18.02.2022 г. №109 «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков предоставления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля».
6. Приказ Минприроды России от 24.01.2022 г. №35 «Об утверждении порядка предоставления юридическими лицами независимо от их организационно-правовой формы и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими сбор информации о состоянии окружающей среды и ее загрязнении, в Федеральную службу по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды указанной информации, а также информации о чрезвычайных ситуациях техногенного характера, которые оказали, оказывают и (или) могут оказать негативное воздействие на окружающую среду».
7. Приказ Росгидромета от 02.02.2017 г. №23 «Об утверждении Концепции совершенствования системы мониторинга загрязнения окружающей среды с учетом конкретизации за-

дач федерального, регионального и локального уровней на 2017–2025 годы».

8. Федеральный закон от 4.05.1999 г. №96–ФЗ «Об охране атмосферного воздуха».

9. Федеральный закон от 10.01.2002 №7–ФЗ «Об охране окружающей среды».

10. Федеральный закон от 31.12.2005 №199–ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с совершенствованием разграничения полномочий».

11. https://rpn.gov.ru/regions/16/for_users/report/ (дата обращения: 01.08.2023).

12. <http://www.tatarmeteo.ru/ru/monitoring-okruzhayushhej-sredy/set-stancij-po-monitoringu-zagryazneniya-okruzhayushhej-sredy.html> (дата обращения: 01.08.2023).

References

1. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii prirodnih resursov i ob ohrane okruzhayushchej sredy Respubliki Tatarstan v 2022 godu [State report on the state of natural resources and environmental protection of the Republic of Tatarstan in 2022]. Kazan, 2023. 397 p.
2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 06.06.2013 No 477 «Ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy» [Decree of the Government of the Russian Federation dated 06.06.2013 No 477 «On the implementation of state monitoring of the state and pollution of the environment»].
3. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.03.2021 No 392 «Ob utverzhdenii Polozheniya ob ohrannoj zone stacionarnyh punktov nablyudenij za sostoyaniem okruzhayushchej sredy, ee zagryazneniem, o priznanii utrativshim silu postanovleniya Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27.08.1999 No 972 ipriznanii ne dejstvuyushchim na territorii Rossijskoj Federacii postanovleniya Soveta Ministrov SSSR ot 6.01.1983 No 19» [Decree of the Government of the Russian Federation dated 17.03.2021 No 392 «On approval of the Regulations on the buffer zone of stationary observation points for the state of the environment and its pollution»].
4. Programmno-tekhnicheskoe obespechenie ucheta ob'ektov, okazyvayushchih negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu [Software and hardware for accounting for objects that have a negative impact on the environment] // <https://rpn.gov.ru/about/informing/systems/uonvos/> (accessed: 01.08.2023).
5. Prikaz Minprirody Rossii ot 18.02.2022 No 109 «Ob utverzhdenii trebovanij k soderzhaniyu programmy proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya, poryadka i srokov predostavleniya otcheta ob organizacii i o rezul'tatah osushchestvleniya proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya» [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 18.02.2022 No 109 «On approval of the requirements for the content of the industrial environmental control program, the procedure and deadlines for submitting a report on the organization and results of industrial environmental control»].
6. Prikaz Minprirody Rossii ot 24.01.2022 No 35 «Ob utverzhdenii poryadka predostavleniya yuridicheskimi licami nezavisimo ot ih organizacionno-pravovoj formy i individual'nymi predprinimatel'nyami, osushchestvlyayushchimi sbor informacii o sostoyanii okruzhayushchej sredy i eezagryaznenii, v Federal'nyu sluzhbu po gidrometeorologii i monitoring okruzhayushchej sredy ukazannoj informacii, a takzhe informacii o chrezvychajnyh situacijah tekhnogenno haraktera, kotorye okazali, okazyvayuti (ili) mogut okazat' negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu» [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 24.01.2022

No 35 «On approval of the procedure for the provision by legal entities, regardless of their organizational and legal form and individual entrepreneurs collecting information on the state of the environment and its pollution, to the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring environment of the specified information, as well as information on emergency situations of a man-made nature that have had, are having and (or) may have a negative impact on the environments»].

7. Prikaz Rosgidrometa ot 02.02.2017 No 23 «Ob utverzhdenii Konceptii sovershenstvovaniya sistemy monitoring zagryazneniya okruzhayushchej sredy s uchedom konkretizatsii zadach federal'nogo, regional'nogo i lokal'nogo urovnej na 2017–2025» [Order of Roshydromet dated 02.02.2017 No 23 «On approval of the Concept for improving the environmental pollution monitoring system, taking into account the specification of the tasks of the federal, regional and local levels for 2017–2025»].

8. Federal'nyj zakon ot 4.05.1999 No 96-FZ «Ob ohrane atmosfernogo vozduha» [Federal Law dated 4.05.1999 No 96-FZ «On the protection of atmospheric air»].

9. Federal'nyj zakon ot 10.01.2002 No 7-FZ «Ob ohrane okruzhayushchej sredy» [Federal Law dated 10.01.2002 No 7-FZ «On environmental protection»].

10. Federal'nyj zakon ot 31.12.2005 No 199-FZ «O vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii v svyazi s sovershenstvovaniem razgranichenij apolnomochij» [Federal Law dated 31.12.2005 No 199-FZ «On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Connection with the Improvement of the Separation of Powers»].

11. https://rpn.gov.ru/regions/16/for_users/report/ (accessed: 01.08.2023).

12. <http://www.tatarmeteo.ru/ru/monitoring-okruzhayushhej-sredy/set-stancij-po-monitoringu-zagryazneniya-okruzhayushhej-sredy.html> (accessed: 01.08.2023).

Shagidullina R.A., Shagidullin A.R., Nurmehamitova V.A., Ibragimova A.A., Gilyazova A.F., Shagidullin R.R. **Proposals for improving the efficiency of air pollution monitoring in the Republic of Tatarstan.**

The article provides an overview of the requirements of the environmental legislation of the Russian Federation on atmospheric air monitoring with an analysis of the problems related to the organization of the effective conduct of such monitoring. Proposals have been prepared to improve the performance of relevant work in the Republic of Tatarstan. The prepared proposals are also relevant in general for the entire territory of the Russian Federation.

Keywords: atmospheric air monitoring; air pollution; facilities that have a negative impact on the environment; environmental safety; local observation systems.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 14.08.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 24.08.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 01.09.2023

Информация о статье / Information about the article

Шагидулина Раиса Абдулловна, доктор химических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: Raisa.Shagidullina@tatar.ru.

Шагидуллин Артур Рифгатович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: Artur.Shagidullin@tatar.ru.

Нурмехамитова Виолетта Алмазовна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: violka9641@gmail.com.

Мусина Аделина Артуровна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: adelina221997.97.13@gmail.com.

Гильязова Алия Фаратовна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: aliya020@mail.ru

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

Information about the authors

Raisa A. Shagidullina, D.Sci. in Chemistry, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: Raisa.Shagidullina@tatar.ru.

Artur R. Shagidullin, Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: Artur.Shagidullin@tatar.ru.

Violetta A. Nurmehamitova, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: violka9641@gmail.com.

Adelina A. Musina, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: adelina221997.97.13@gmail.com.

Aliya F. Gilyazova, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: aliya020@mail.ru.

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



А.С. Петухов, Т.А. Кремлева, Г.А. Петухова, Н.А. Хритохин

Тюменский государственный университет, a.s.petukhov@utmn.ru

БИОХИМИЧЕСКАЯ ОТВЕТНАЯ РЕАКЦИЯ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA*) НА НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Цель работы – поиск взаимосвязи между биохимическими показателями березы повислой (*Betula pendula* L.) и накоплением тяжелых металлов в г. Тюмени. Пробы почв и растений были отобраны в условно-чистом районе, вблизи промышленных предприятий и транспортных узлов города. Содержание металлов в почвах и растениях определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии, биохимические показатели (продукты перекисного окисления липидов, содержание пигментов фотосинтеза, флавоноидов и активность каталазы) – фотометрически. Накопление металлов почвами убывало относительно контроля в ряду: $Cd > Pb > Cr > Ni > Zn > Cu > Fe > Co > Mn$. Аккумуляция металлов в листьях березы убывала относительно контроля в ряду: $Pb > Cr > Fe > Co > Cu > Ni > Zn > Mn > Cd$. Загрязнение городской среды приводило к росту окислительных процессов в клетках березы, что сопровождалось снижением содержания флавоноидов и активности каталазы. Увеличение содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях березы стало главным адаптационным механизмом к накоплению металлов, а изменение активности каталазы оказалось наиболее чувствительной ответной реакцией. Выявлены положительные корреляции между содержанием металлов и концентрацией продуктов перекисного окисления липидов и пигментов фотосинтеза. Содержание флавоноидов и активность каталазы отрицательно коррелировали с содержанием металлов в березе и почве. Согласно результатам факторного анализа степень влияния металлов на биохимические показатели убывала в ряду: $Zn \approx Cu > Cr > Ni \approx Co \approx Pb \approx Cd > Fe \approx Mn$.

Ключевые слова: тяжелые металлы; береза повислая; перекисное окисление липидов; антиоксиданты; пигменты фотосинтеза.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.56.64>

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) носит повсеместный характер (Barsova et al., 2019). Поступление металлов в почву приводит к их поступлению и накоплению в растениях (Zwolak et al., 2019). Известно, что ТМ токсичны и нарушают многие процессы жизнедеятельности – роста, развития, фотосинтеза, дыхания, водного обмена (Титов и др., 2014).

Стресс растений от накопления металлов проявляется на биохимическом уровне. Металлы способны вызывать окислительные процессы в клетках, увеличивать концентрацию активных форм кислорода (АФК) и участвовать в процессах перекисного окисления липидов (ПОЛ) (Maleki et al., 2017). В свою очередь, это вызывает разнообразные ответные реакции антиоксидантных систем, которые включают в себя ферменты (каталаза, пероксидаза, супероксиддисмутаза) и низкомолекулярные соединения (каротиноиды, флавоноиды, пролин, аскорбиновая кислота и др.) (Arif et al., 2016).

Изучение биохимического отклика растений

на действие ТМ важно для установления механизмов их токсичности и способов адаптации растений к неблагоприятным условиям. Кроме этого, биохимические показатели растений могут быть биомаркером экологической обстановки в районе исследования. Большинство экспериментальных работ, посвященных влиянию ТМ на биохимические процессы в клетках растений, проводятся в модельных условиях с искусственным внесением металлов (Масленников, 2013; Ахверди, 2020). Проблема биохимического отклика растений в условиях городской среды недостаточно раскрыта (Великанова и др., 2013; Doganlar et al., 2015) и требует дальнейших исследований. Целью работы стал поиск взаимосвязи между биохимическими показателями березы повислой (*Betula pendula* L.) и накоплением ТМ в условиях городской среды.

Материал и методы исследования

Пробы почв и листьев березы повислой (*Betula pendula*) собраны в г. Тюмени в сентябре 2022 г. на следующих участках: контроль – участок на

удалении 40 км от города; на удалении 200 м от аэропорта «Рощино», железнодорожного вокзала (ЖД вокзал) и автовокзала; на удалении 200 м от предприятий: моторостроительного завода (Мотор. з-д), нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), аккумуляторного завода (Аккумулятор. з-д) и металлургического завода (УГМК).

Отбор проб почв выполнен методом конверта на глубину 0–10 см. Зеленые листья березы (не менее 100 шт. на каждом участке) отбирали на высоте 2–2.5 м от земли.

В пробах почв определяли содержание кислоторастворимых форм металлов с помощью 5М HNO_3 (РД 52.18.191–2018) и подвижных форм с извлечением ацетатно-аммонийным буфером $\text{pH}=4.8$ (РД 52.18.289–90). Извлечение металлов из листьев березы проводили 5М HNO_3 .

Пробоподготовку проводили в двух параллелях. Содержание ТМ определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе PlasmaQuant PQ 9000 в центре коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» ТюмГУ.

Анализ диеновых конъюгатов и оснований Шиффа проводился в гептановых экстрактах на длине волны 233 нм и 365 нм, соответственно (Шведова, Полянский, 1992). Исследование содержания каротиноидов проведено спектральным анализом спиртовых экстрактов на длине волны 440 нм (Шульгин, Ничипорович, 1974). Определение флавоноидов, родственных рутина, проводилось проведением цветной реакции флавоноидов из спиртовых экстрактов растений с хлоридом алюминия и последующим измерением оптической плотности продукта реакции на $\lambda=410$ нм (Третьяков, 1998). Анализ активности каталазы в растениях проводился с помощью спектрофотометрии путем проведения цветной реакции между молибдатом аммония и перекисью водорода с последующим измерением оптической плотности продуктов реакции на $\lambda=470$ нм (Королюк, 1988).

Полученные результаты были подвергнуты стандартной статистической обработке с расчетом доверительного интервала при $P=0.95$, проведением корреляционного и факторного анализа по методу главных компонент в программе Statistica 12.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения содержания ТМ в почвах г. Тюмени представлены в таблице 1. Содержание большинства металлов было повышено по сравнению с контролем практически на всех

участках городской среды. В целом, накопление ТМ почвами относительно контроля убывало в ряду: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Co} > \text{Mn}$. По кислоторастворимым формам превышение контроля достигало для Cd 18 раз, для Pb – 20 раз, Cr – 12 раз, Ni – 11 раз, Zn – 5.5 раз. По накоплению ТМ изученные участки можно расположить в следующий ряд: ЖД вокзал > Аккумуляторный завод > УГМК > Аэропорт > НПЗ > Автовокзал > Моторостроительный завод.

Концентрация большинства металлов в листьях березы, произрастающей в городской среде выше, чем в контроле (табл. 2). Накопление в них ТМ относительно контроля убывает в ряду: $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Fe} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cd}$. Превышение контроля для Pb достигало 95 раз, Cr – 22 раз, Fe – 6 раз, Co – 4 раз. Районы города располагаются в следующий раз по относительному накоплению ТМ в листьях березы: УГМК > Аккумуляторный завод > НПЗ > ЖД вокзал > Моторостроительный завод > Автовокзал > Аэропорт.

Содержание продуктов ПОЛ в листьях березы было повышено во всех районах исследования по сравнению с контролем на 35–110% для оснований Шиффа и на 8–13% для диеновых конъюгатов (рис. 1). Полученный результат свидетельствует о стрессе для растений, вызванном загрязнением городской среды. Выявлены положительные корреляции между содержанием Pb, Cu, Fe и Cr в листьях и уровнем продуктов ПОЛ (r 0.59, 0.54, 0.62, 0.70, соответственно). Металлы, для которых характерна переменная валентность (Cu, Fe, Cr), могут катализировать образование активных форм кислорода и свободных радикалов жирных кислот, тем самым иницируя свободнорадикальное окисление. В то же время, свинец, для которого окислительно-восстановительные превращения не характерны, обладает высоким сродством к тиольным функциональным группам в составе биомолекул и поэтому может повреждать структуру антиоксидантов, смещая гомеостаз в клетках в сторону окислительных процессов. Так, содержание продуктов ПОЛ в проростках овса было повышено по сравнению с контролем при загрязнении почвы Cd, Co и Mn (Ахверди, 2020). Накопление продуктов ПОЛ в клетках одуванчика на территории бывших шахт в Италии служило индикатором загрязнения почвы ТМ (Wansha et al., 2012).

Анализ содержания пигментов фотосинтеза в листьях березы показал (рис. 2), что содержание хлорофилла *a* в растениях городской среды было на уровне контроля и повышено только в районе ЖД вокзала – на 40%. Содержание хлорофилла *b* было повышено на 40–110% в районах аккумуля-

Таблица 1. Содержание ТМ в почвах (над чертой – подвижные формы, под чертой – кислоторастворимые формы; среднее $\pm$ доверительный интервал), мг/кг
Table 1. Heavy metal content in soils (above the line – mobile forms, under the line – acid-soluble fraction, mean $\pm$ confidence interval), mg/kg

ТМ Me- tals	Контроль Control	Автовокзал Bus station	Мотор. 3-д Engine- building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумулятор. 3-д Battery- manufactur- ing plant	УГМК Iron and steel works	Аэропорт Airport	ЖД вокзал Railway station
Cu	<u>0.33$\pm$0.01</u> 6.1 $\pm$ 0.2	<u>0.24$\pm$0.03</u> 12 $\pm$ 1	<u>0.45$\pm$0.02</u> 7.5 $\pm$ 0.3	<u>0.64$\pm$0.05</u> 9.4 $\pm$ 0.3	<u>0.35$\pm$0.02</u> 20 $\pm$ 1	<u>0.51$\pm$0.02</u> 15 $\pm$ 1	<u>0.17$\pm$0.01</u> 14 $\pm$ 1	<u>2.9$\pm$0.1</u> 30 $\pm$ 2
Zn	<u>1.1$\pm$0.1</u> 15 $\pm$ 1	<u>2.1$\pm$0.1</u> 25 $\pm$ 2	<u>2.7$\pm$0.1</u> 13 $\pm$ 1	<u>8.0$\pm$0.4</u> 27 $\pm$ 2	<u>5.3$\pm$0.2</u> 45 $\pm$ 3	<u>14.2$\pm$0.6</u> 44 $\pm$ 3	<u>4.5$\pm$0.2</u> 33 $\pm$ 2	<u>29$\pm$1</u> 84 $\pm$ 5
Fe	<u>100$\pm$10</u> 4200 $\pm$ 500	<u>5.9$\pm$0.2</u> 5200 $\pm$ 400	<u>26$\pm$1</u> 2000 $\pm$ 100	<u>15$\pm$1</u> 2500 $\pm$ 500	<u>12$\pm$1</u> 8400 $\pm$ 100	<u>26$\pm$2</u> 3700 $\pm$ 500	<u>7.7$\pm$0.2</u> 7000 $\pm$ 800	<u>22$\pm$1</u> 6400 $\pm$ 900
Mn	<u>109$\pm$2</u> 580 $\pm$ 20	<u>88$\pm$5</u> 550 $\pm$ 20	<u>115$\pm$2</u> 380 $\pm$ 10	<u>119$\pm$3</u> 370 $\pm$ 10	<u>121$\pm$4</u> 480 $\pm$ 10	<u>158$\pm$7</u> 430 $\pm$ 10	<u>113$\pm$1</u> 600 $\pm$ 10	<u>96$\pm$2</u> 300 $\pm$ 10
Pb	<u>1.2$\pm$0.1</u> 7.9 $\pm$ 0.2	<u>1.3$\pm$0.1</u> 9.7 $\pm$ 0.5	<u>2.0$\pm$0.1</u> 8.1 $\pm$ 0.4	<u>4.6$\pm$0.2</u> 14 $\pm$ 1	<u>53$\pm$2</u> 156 $\pm$ 9	<u>3.2$\pm$0.2</u> 13 $\pm$ 1	<u>2.4$\pm$0.1</u> 17 $\pm$ 1	<u>54$\pm$2</u> 120 $\pm$ 4
Cd	<u>$\leq$0.01</u> $\leq$ 0.01	<u>0.01$\pm$0.01</u> 0.02 $\pm$ 0.01	<u>$\leq$0.01</u> $\leq$ 0.01	<u>0.03$\pm$0.01</u> 0.03 $\pm$ 0.01	<u>0.08$\pm$0.01</u> 0.17 $\pm$ 0.01	<u>0.07$\pm$0.01</u> 0.10 $\pm$ 0.01	<u>0.08$\pm$0.01</u> 0.15 $\pm$ 0.01	<u>0.14$\pm$0.01</u> 0.17 $\pm$ 0.01
Ni	<u>3.8$\pm$0.1</u> 13 $\pm$ 1	<u>2.3$\pm$0.1</u> 24 $\pm$ 1	<u>3.5$\pm$0.2</u> 14 $\pm$ 1	<u>3.1$\pm$0.2</u> 23 $\pm$ 1	<u>2.4$\pm$0.1</u> 38 $\pm$ 2	<u>2.9$\pm$0.2</u> 19 $\pm$ 1	<u>1.9$\pm$0.1</u> 31 $\pm$ 2	<u>12$\pm$1</u> 145 $\pm$ 4
Co	<u>0.28$\pm$0.01</u> 6.6 $\pm$ 0.9	<u>0.17$\pm$0.01</u> 9.6 $\pm$ 0.9	<u>0.41$\pm$0.04</u> 5.4 $\pm$ 0.1	<u>0.30$\pm$0.02</u> 4.8 $\pm$ 0.2	<u>0.41$\pm$0.02</u> 8.8 $\pm$ 1.6	<u>0.46$\pm$0.02</u> 5.8 $\pm$ 0.8	<u>0.33$\pm$0.01</u> 9.8 $\pm$ 0.3	<u>0.64$\pm$0.03</u> 8.8 $\pm$ 0.6
Cr	<u>0.60$\pm$0.05</u> 8.4 $\pm$ 0.4	<u>0.26$\pm$0.02</u> 17 $\pm$ 1	<u>0.28$\pm$0.03</u> 6.2 $\pm$ 0.1	<u>0.43$\pm$0.08</u> 14 $\pm$ 1	<u>0.28$\pm$0.09</u> 25 $\pm$ 1	<u>0.48$\pm$0.02</u> 14 $\pm$ 1	<u>0.19$\pm$0.04</u> 19 $\pm$ 1	<u>1.3$\pm$0.1</u> 99 $\pm$ 3

Таблица 2. Содержание ТМ в листьях березы (среднее $\pm$ доверительный интервал), мг/кг
Table 2. Heavy metal content in *Betula pendula* (mean $\pm$ confidence interval), mg/kg

ТМ Me- tals	Контроль Control	Автовокзал Bus station	Мотор. 3-д Engine- building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумулятор. 3-д Battery- manufactur- ing plant	УГМК Iron and steel works	Аэропорт Airport	ЖД вокзал Railway station
Cu	3.4 $\pm$ 0.1	4.4 $\pm$ 0.1	3.8 $\pm$ 0.1	5.7 $\pm$ 0.1	4.5 $\pm$ 0.1	8.3 $\pm$ 0.2	3.1 $\pm$ 0.1	3.9 $\pm$ 0.1
Zn	94 $\pm$ 2	82 $\pm$ 2	102 $\pm$ 2	154 $\pm$ 6	113 $\pm$ 3	138 $\pm$ 2	80 $\pm$ 2	83 $\pm$ 4
Fe	84 $\pm$ 2	153 $\pm$ 10	88 $\pm$ 2	365 $\pm$ 8	151 $\pm$ 2	480 $\pm$ 6	97 $\pm$ 3	219 $\pm$ 5
Mn	272 $\pm$ 8	112 $\pm$ 3	412 $\pm$ 9	399 $\pm$ 12	112 $\pm$ 4	228 $\pm$ 2	303 $\pm$ 11	49 $\pm$ 1
Pb	0.07 $\pm$ 0.01	0.48 $\pm$ 0.07	1.3 $\pm$ 0.1	1.3 $\pm$ 0.1	6.4 $\pm$ 0.2	5.1 $\pm$ 0.2	0.14 $\pm$ 0.02	1.4 $\pm$ 0.1
Cd	0.20 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.01	0.15 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.01	0.21 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01	$\leq$ 0.01
Ni	4.1 $\pm$ 0.2	7.6 $\pm$ 0.2	3.8 $\pm$ 0.2	4.1 $\pm$ 0.2	3.0 $\pm$ 0.1	3.8 $\pm$ 0.1	6.0 $\pm$ 0.2	4.6 $\pm$ 0.1
Co	0.08 $\pm$ 0.01	0.10 $\pm$ 0.01	0.20 $\pm$ 0.01	0.31 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.01	0.17 $\pm$ 0.01	0.12 $\pm$ 0.01	0.10 $\pm$ 0.01
Cr	0.17 $\pm$ 0.01	0.89 $\pm$ 0.05	0.51 $\pm$ 0.04	2.5 $\pm$ 0.1	0.45 $\pm$ 0.07	2.6 $\pm$ 0.1	0.43 $\pm$ 0.02	1.2 $\pm$ 0.1

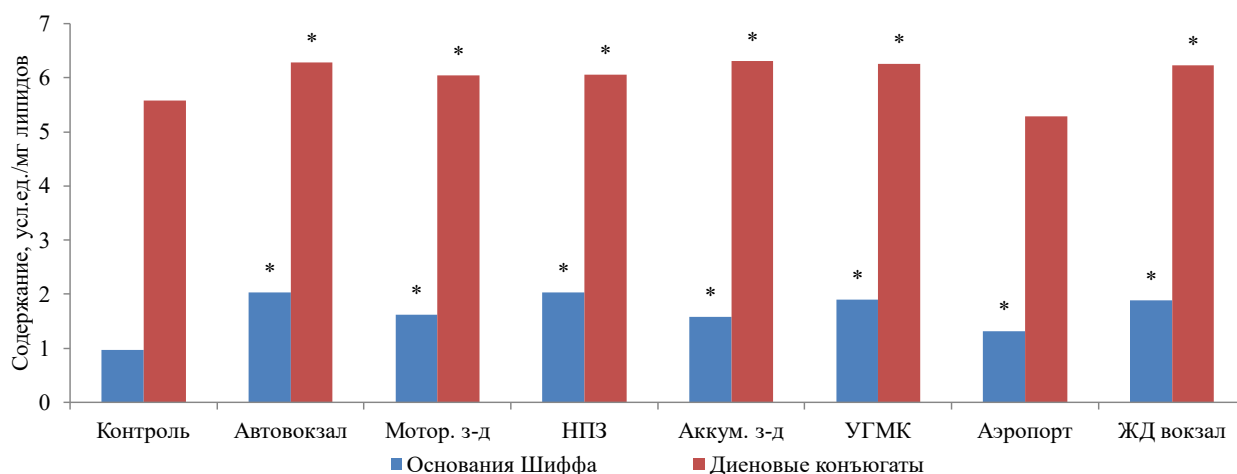


Рис. 1. Содержание продуктов перекисного окисления липидов в листьях березы
*статистически достоверные отличия между контролем и вариантом опыта ($P \leq 0.05$)

Fig. 1. Lipid peroxidation products concentration in birch leaves
* statistically significant differences between control and test group ($P \leq 0.05$)

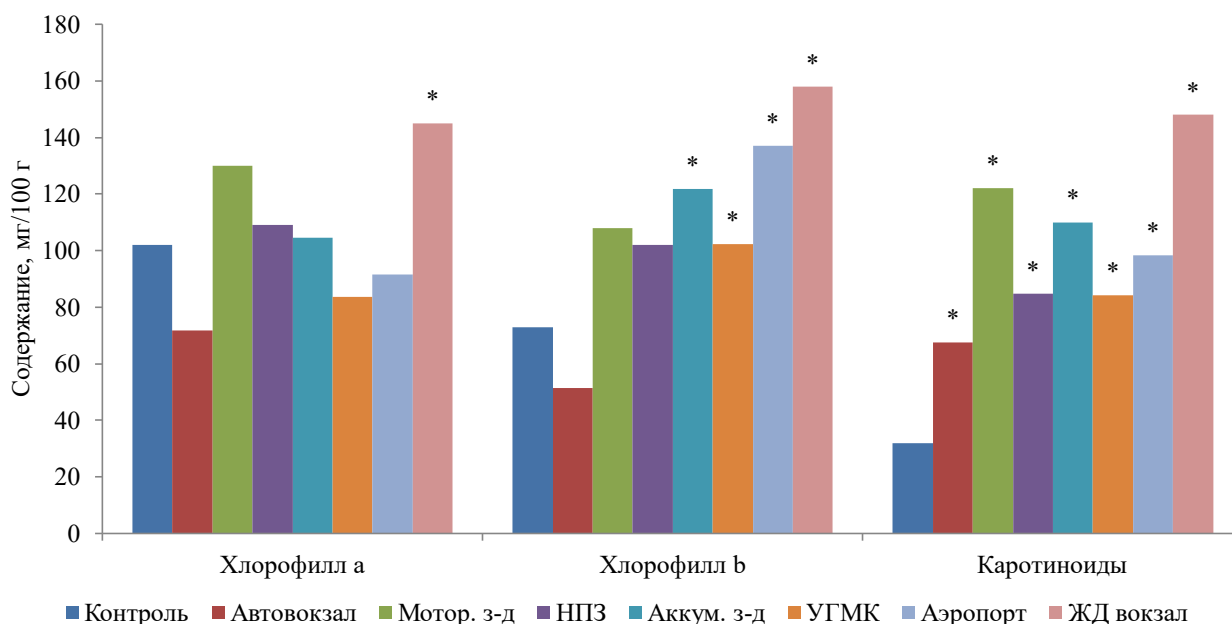


Рис. 2. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях березы

Fig. 2. Photosynthetic pigments concentration in birch leaves

муляторного и металлургического заводов, аэропорта и ЖД вокзала. Содержание каротиноидов в листьях березы из городской среды было выше контроля на всех участках, как минимум, в 2 раза. В литературе сообщалось о стимулирующем действии умеренных доз Cd на содержание пигментов фотосинтеза в чине приморской (Масленников, 2013). Увеличение содержания пигментов фотосинтеза в древесных растениях в условиях городской среды наблюдалось в г. Адана, Турция (Doganlar et al., 2015).

Увеличение содержания пигментов фотосинтеза в листьях березы в городской среде может быть вызвано стрессом для растений. Содержание хлорофилла *a* в листьях березы положительно коррелировало с концентрацией оснований Шиффа

($r=0.56$). Наибольшее содержание всех пигментов наблюдалось в районе ЖД вокзала, где была зафиксирована максимальная степень загрязнения почвы ТМ. Ответная реакция растений на загрязнение среды была наиболее выражена в случае каротиноидов. Каротиноиды выполняют функцию «светособирающей антенны», однако вместе с этим обладают антиоксидантными свойствами и способны связывать супероксидный анион-радикал (Титов и др., 2014). Поэтому увеличение содержания каротиноидов может быть признаком адаптации растений к росту концентрации активных форм кислорода в клетках и металлов, провоцирующих окислительные процессы.

Уменьшение отношения содержания хлорофилла *a* к *b* считается показателем стресса

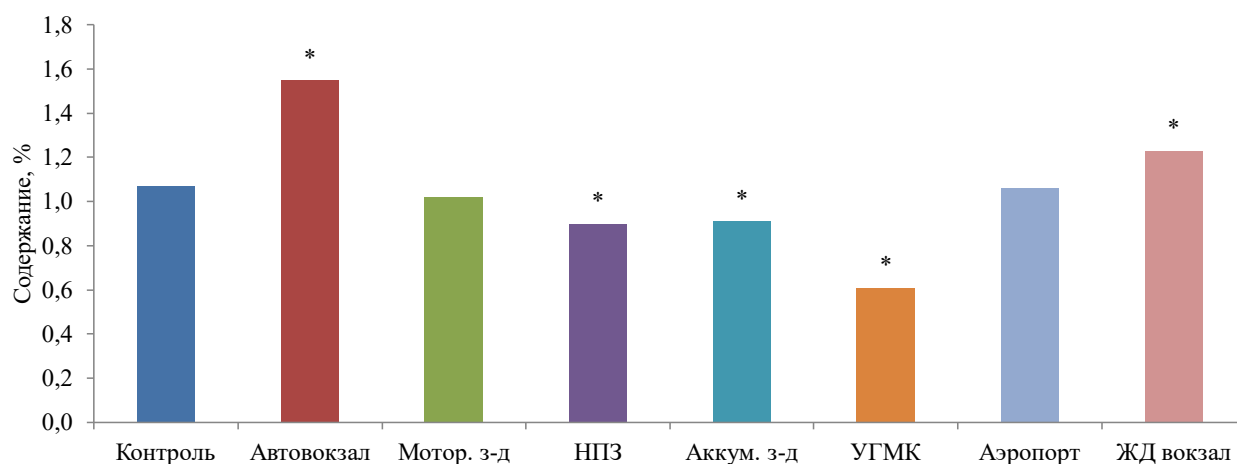


Рис. 3. Содержание флавоноидов в листьях березы

Fig. 3. Flavonoids concentration in birch leaves

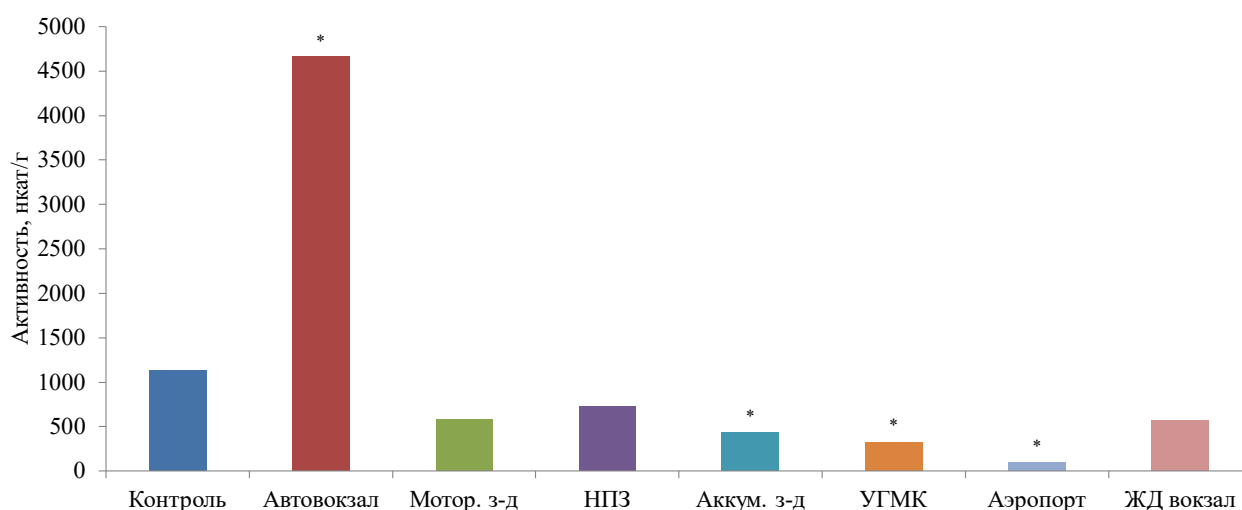


Рис. 4. Активность каталазы в листьях березы

Fig. 4. Catalase activity in birch leaves

растений (Кушнарева, Перекрестова, 2015). Соотношение хлорофилла *a* к *b* в листьях березы из городской среды было снижено на 15–50% на всех участках, за исключением автовокзала, что является свидетельством стресса растений. Корреляционный анализ показал, что с увеличением концентрации Zn, Ni, Cr, Pb, Cu и Cd в почвах, содержание пигментов фотосинтеза в листьях березы, как признаке адаптации растений к загрязнению, увеличивалось (r 0.68, 0.65, 0.63, 0.61, 0.72, 0.81, соответственно).

Ответная реакция березы на загрязнение городской среды по содержанию флавоноидов в листьях оказалось неоднозначной (рис. 3). В районе НПЗ, аккумуляторного завода и УГМК наблюдалось снижение содержания флавоноидов на 15–40% по сравнению с контролем. Напротив, вблизи автовокзала и ЖД вокзала содержание флавоноидов было повышено до 40%. Вероятно, это иллюстрирует способность березы к адаптации в усло-

виях относительно низкого (автовокзал) и высокого (ЖД вокзал) уровней загрязнения. При этом были отмечены отрицательные корреляции между содержанием Zn, Pb, Fe, Cu и Cd в растениях (r -0.74, -0.61, -0.58, -0.64, -0.64, соответственно). Вероятно, это объясняется хелатированием ионов металлов с фенольными группами флавоноидов или нарушением пути биосинтеза флавоноидов в условиях накопления ТМ. В литературе сообщалось о повышении содержания флавоноидов в древесных растениях в условиях загрязнения г. Калининграда (Чупахина и др., 2011). Содержание флавоноидов в горце птичьем на территории г. Воронеж было ниже по сравнению с заповедной зоной (Великанова и др., 2013).

Изменение активности каталазы в листьях березы оказалось самым чувствительным из изученных биохимических показателей (рис. 4). В городской среде по сравнению с контролем ее значения были ниже в районах аэропорта, ак-

Таблица 3. Результаты факторного анализа
Table 3. The results of factor analysis

Показатель Variable	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Показатель Variable
Каталаза	0.18	0.27	-0.78
Флавоноиды	-0.05	0.80	-0.58
Основания Шиффа	-0.36	-0.46	-0.77
Диеновые конъюгаты	-0.40	-0.37	-0.34
Хлорофилл <i>a</i>	-0.71	-0.25	-0.26
Хлорофилл <i>b</i>	-0.78	-0.18	0.13
Каротиноиды	-0.80	-0.12	-0.08
Zn почва	-0.96/-0.88	-0.03/-0.24	0.04/-0.12
Zn растения	0.16	-0.92	-0.02
Ni почва	-0.93/-0.80	0.19/0.09	-0.16/-0.23
Ni растения	0.17	0.59	-0.54
Cr почва	-0.93/-0.71	0.19/-0.01	-0.16/-0.16
Cr растения	-0.12	-0.85	-0.32
Co почва	-0.36/ -0.85	0.79/-0.27	0.11/0.21
Co растения	0.21	-0.74	-0.43
Pb почва	-0.78/-0.86	0.15/0.13	0.33/0.24
Pb растения	-0.31	-0.49	0.51
Mn почва	0.62/0.13	0.56/ -0.81	0.36/0.52
Mn растения	0.42	-0.43	-0.22
Fe почва	-0.50/0.39	0.55/0.11	0.47/0.30
Fe растения	-0.17	-0.85	-0.13
Cu почва	-0.98/-0.87	0.08/-0.01	0.09/-0.26
Cu растения	0.02	-0.84	-0.10
Cd почва	-0.77/-0.91	0.10/-0.05	0.47/0.26
Cd растения	0.56	-0.42	0.48
% объясняемой дисперсии	41	23	12

кумуляторного и металлургического заводов в 2.5–10 раз. Ранее снижение активности каталазы в листьях березы было выявлено на территории промышленной зоны г. Йошкар-Ола (Воскресенский, Воскресенская, 2011).

В то же время, активность каталазы в растениях из района автовокзала была повышена в 4 раза. Активность каталазы положительно коррелировала с концентрацией оснований Шиффа в клетках ($r=0.51$), что свидетельствует об активации антиоксидантного ответа растений в условиях низкого загрязнения в районе автовокзала. Увеличение активности каталазы было ранее зарегистрировано в придорожной растительности на севере Индии (Rai, 2015). Корреляционный анализ показал, что активность каталазы отрицательно коррелировала с содержанием Co и Mn в почве ($r=-0.50$; -0.58). Вероятно, это связано с повреждением структуры и биосинтеза фермен-

та в условиях поступления металлов. Выявлена положительная корреляция между активностью каталазы и содержанием флавоноидов ($r=0.72$), что говорит об однонаправленном действии антиоксидантных систем ферментной и низкомолекулярной природы.

Факторный анализ выявил (табл. 3), что наибольшее значение для растений имеет загрязнение почвы металлами, что приводит к увеличению содержания пигментов фотосинтеза в листьях березы как механизм адаптации. Содержание Zn, Ni, Cr, Co, Pb, Cu и Cd в почвах, а также содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов было объединено в факторе 1. Фактор 2 объясняет поступление ТМ в растения и детоксификацию металлов флавоноидами, в этот фактор входят содержание Zn, Cr, Co, Fe, Cu в растениях и содержание флавоноидов с противоположным знаком факторной нагрузки, что указывает на отрицательную корреляцию. Антиоксидантная функция каталазы в проведенном эксперименте оказалась менее значимой и входила только в фактор 3, однако напрямую коррелировала с процессами ПОЛ (концентрация оснований Шиффа).

По результатам факторного анализа ТМ можно расположить в следующий ряд по степени влияния на биохимические показатели березы: $Zn \approx Cu > Cr > Ni \approx Co \approx Pb \approx Cd > Fe \approx Mn$. В левой части ряда располагаются мягкие кислотные частицы Zn^{2+} и Cu^{2+} , обладающие сродством к серосодержащим функциональным группам, а также жесткая кислотная частица Cr^{3+} , обладающая большим сродством к кислородсодержащим функциональным группам биомолекул. Ионы Cu^{2+} и Cr^{3+} склонны к окислительно-восстановительным превращениям и тем самым могут участвовать в процессах перекисного окисления. В начале ряда располагаются ионы с небольшим ионным радиусом: (Zn^{2+}) 0.71 Å, (Cu^{2+}) 0.74 Å, (Cr^{3+}) 0.76 Å, в то время как ближе к концу – ионы большего радиуса: (Pb^{2+}) 1.12 Å, (Cd^{2+}) 1.09 Å, (Fe^{2+}) 0.92 Å, (Mn^{2+}) 0.97 Å. Вероятно, это характеризует способность того или иного металла соответствовать в пространстве центрам потенциального связывания с биомолекулами.

Представляет интерес сопоставление указанного ряда ТМ с рядами их накопления в почвах и растениях. Положение Mn и Cd в конце ряда

коррелирует с их низкой степенью накопления в растениях. Хром обладает относительно высоким накоплением в почвах и растениях, а также влиянием на биохимические показатели. Во всех составленных рядах Ni и Co занимают преимущественно промежуточное положение. Медь и цинк обладают существенно большей связью с биохимическими процессами, несмотря на их умеренное накопление почвами и растениями. Вероятно, это обусловлено их жизненно-важными функциями в растениях. Степень накопления Pb в почвах и растениях существенно больше степени его влияния на биохимические процессы, что вероятно обусловлено адаптацией городских растений к его поступлению. Несмотря на то, что Fe участвует во многих биохимических процессах и накапливается в растениях, его степень влияния на биохимические показатели оказалось низкой. В листьях березы, произрастающей на территории Тюмени, элемент находится в диапазоне естественных концентраций, по сравнению с другими металлами, поступление которых носит антропогенный характер.

Заключение

Накопление ТМ почвами г. Тюмени убывало относительно контроля в ряду: Cd > Pb > Cr > Ni > Zn > Cu > Fe > Co > Mn. Аккумуляция металлов в листьях березы убывала относительно контроля в ряду: Pb > Cr > Fe > Co > Cu > Ni > Zn > Mn > Cd. Загрязнение городской среды приводило к росту окислительных процессов в клетках березы, что сопровождалось снижением содержания флавоноидов и активности каталазы. Увеличение содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях березы стало главным адаптационным механизмом к накоплению ТМ, а изменение активности каталазы оказалось наиболее чувствительной ответной реакцией. В условиях низкой степени загрязнения отмечена адаптация растений по увеличению содержания флавоноидов и активности каталазы. Степень влияния металлов на биохимические показатели убывала в ряду: Zn ≈ Cu > Cr > Ni ≈ Co ≈ Pb ≈ Cd > Fe ≈ Mn.

Список литературы

- Ахверди Д.С. Влияние тяжелых металлов на перекисное окисление липидов в вегетативных органах и семенах овса посевного (*Avena sativa* L.) // Международный журнал фундаментальных и прикладных исследований. 2020. №4. С. 36–42. doi: 10.17513/mjpf.13052.
- Великанова Н.А., Сливкин А.И., Гапонов С.П. Изучение накопления флавоноидов травой горца птичьего, собранного в разных с экологической точки зрения районах города Воронежа и его окрестностей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2013. №1. С. 181–185.
- Воскресенский В.С., Воскресенская О.Л. Изменение активности окислительно-восстановительных ферментов у древесных растений в условиях городской среды // Вестник МарГТУ. 2011. №1. С. 75–82.
- Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова Н.О., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. 1988. №1. С. 16.
- Кушнарева О.П., Перекрестова Е.Н. Влияние различных концентраций солей меди и свинца на содержание хлорофилла и содержание углерода в листьях растений // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. №10. С. 294–297.
- Масленников П.В. Реакция антиоксидантной системы чины приморской на действие ионов кадмия // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. №11. С. 67–70.
- РД 52.18.191-2018. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии.
- РД 52.18.289-90. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом.
- Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
- Третьяков Н.Н. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Колос, 1998. 639 с.
- Чупахина Г.Н., Масленников П.В., Мальцева Е.Ю., Фролов Е.М., Бессережнова М.И. Антиоксидантный статус растений в условиях загрязнения кадмием городской среды // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. №7. С. 16–23.
- Шведова А. А., Полянский Н. Б. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований // Исследование синтетических и природных антиоксидантов in vitro и in vivo. М.: Наука, 1992. С. 72–73.
- Шульгин И.А., Ничипорович А.А. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм // Хлорофилл. Минск: Наука и техника, 1974. С. 127–136.
- Arif N., Yadav V., Singh S., Singh S., Ahmad P., Mishra R.K., Sharma S., Tripathi D.K., Dubey N.K., Chauhan D.K. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // Plant response to xenobiotics. 2016. P. 97–125. doi: 10.1007/978-981-10-2860-1_5.
- Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // Environmental pollution. 2019. Vol. 249. P. 200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020.
- Doganlar Z.B., Doganlar O., Erdogan S., Onal Y. Heavy metal pollution and physiological changes in the leaves of some shrub, palm and tree species in urban areas of Adana, Turkey // Chemical speciation & bioavailability. 2015. Vol. 24 (2). P. 65–79. doi: 10.3184/095422912X13338055043100.
- Maleki M., Ghorbanpour M., Kariman K. Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metal stress // Plant gene. 2017. Vol. 11. P. 247–254. doi: /10.1016/j.plgene.2017.04.006.
- Rai P.K. Biodiversity of roadside plants and their response to air pollution in an Indo-Burma hotspot region: implications for urban ecosystem restoration // Journal of Asia-Pacific biodiversity. 2015. Vol. 9(1). P. 47–55. doi: 10.1016/j.japb.2015.10.011.
- Wansha M., Bini C., Fontana S., Wansha A., Zilioli D.

Toxicity assessment of contaminated soils from a mining area in Northeast Italy by using lipid peroxidation assay // Journal of geochemical exploration. 2012. Vol. 113. P. 112–117. doi: 10.1016/j.gexplo.2011.09.008

20. Zwolak A., Sarzynska M., Szpyrka E., Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review // Water, air and soil pollution. 2019. Vol. 230. P. 164–175. doi: 10.1007/s11270-019-4221-y.

References

1. Ahverdi D.S. Vliyanie tyazhelyh metallov na perekisnoe okislenie lipidov v vegetativnyh organah i semenah ovsy pos-evnogo (*Avena sativa* L.) [Heavy metals impact on lipid peroxidation in vegetative organs and seeds of the cultivated oat (*Avena sativa* L.) // Mezhdunarodnyj zhurnal fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij. 2020. No 4. P. 36–42. doi: 10.17513/mjpf.13052.

2. Velikanova N.A., Slivkin A.I., Gaponov S.P. Izuchenie nakopleniya flavonoidov travoy gorca ptich'ego, sobrannogo v raznyh s ekologicheskoy tochki zreniya rajonah goroda Voronezha i ego okrestnostej [Investigation of flavonoids content in knot-grass from areas of Voronezh with different ecological situation] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmaciya. 2013. No 1. P. 181–185.

3. Voskresenskij V.S., Voskresenskaja O.L. Izmenenie aktivnosti oksislitel'no-vosstanovitel'nyh fermentov u drevesnyh rastenij v usloviyah gorodskoj sredy [Redox enzymes activity changes in woody plants in the urban environment] // Vestnik MarGTU. 2011. No 1. P. 75–82.

4. Koroljuk M.A., Ivanova L.I., Majorova N.O., Tokarev V.E. Metod opredeleniya aktivnosti katalazy [Method for catalase activity determination] // Laboratornoe delo. 1988. No 1. P. 16.

5. Kushnareva O.P., Perekestova E.N. Vliyanie razlichnyh koncentracij soley medi i svinca na sodержanie hlorofilla i sodержanie ugleroda v list'jah rastenij [The impact of various copper and lead salts concentration on chlorophyll and carbon content in plant leaves] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No 10. P. 294–297.

6. Maslennikov P.V. Reakcija antioksidantnoj sistemy chiny primorskoj na dejstvie ionov kadmija [The response of seaside rank antioxidant systems to cadmium] // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2013. No 11. P. 67–70.

7. RD 52.18.191–2018. Massovaja dolja kislotorastvorimyh form metallov v probah pochv, gruntov i donnyh otlozhenij. Metodika izmerenij metodom atomno-absorbicijnoy spektrometrii [The acid-soluble metal form in soils and sediments. The procedure for atomic-absorption spectroscopy determination].

8. RD 52.18.289-90. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli podviznyh form metallov (medi, svinca, cinka, nikelja, kadmija, kobal'ta, hroma, marganca) v probah pochvy atomno-absorbicijnym analizom [The procedure for metals (Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Co, Cr, Mn) mobile forms determination in soils by atomic absorption spectroscopy].

9. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. Tyazhelye metally i rasteniya [Heavy metals and plants] Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2014. 194 p.

10. Tret'yakov N.N. Fiziologiya i biokhimiya sel'skhozaystvennyh rastenij [Physiology and biochemistry of agricultural plants]. Moscow: Kolos, 1998. 639 p.

11. Chupahina G.N., Maslennikov P.V., Mal'ceva E.Ju., Frolov E.M., Besserezhnova M.I. Antioksidantnyj status rastenij v usloviyah zagrazneniya kadmii gorodskoj sredy [Antioxidant status of plants in conditions of urban environmental pollution by cadmium] // Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. 2011. No 7. P. 16–23.

12. Shvedova A.A., Polyanskij, N.B. Metod opredeleniya

konechnykh produktov perekisnogo okisleniya lipidov v tkanyah – fluoresciuyushchih shiffovyh osnovanij [Method of Schiff bases determination in tissues] // Research of synthetic and natural antioxidants in vitro and in vivo. Moscow: Nauka, 1992. P. 72–73.

13. Shulgin I.A., Nichiporovich A.A. Raschet sodержaniya pigmentov s pomoshch'yu nomogramm [Calculation of pigments content using nomograms] // Hlorofill. Minsk: Nauka i tekhnika, 1974. P. 127–136.

14. Arif N., Yadav V., Singh S., Singh S., Ahmad P., Mishra R.K., Sharma S., Tripathi D.K., Dubey N.K., Chauhan D.K. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // Plant response to xenobiotics. 2016. P. 97–125. doi: 10.1007/978-981-10-2860-1_5.

15. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // Environmental pollution. 2019. Vol. 249. P. 200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020.

16. Doganlar Z.B., Doganlar O., Erdogan S., Onal Y. Heavy metal pollution and physiological changes in the leaves of some shrub, palm and tree species in urban areas of Adana, Turkey // Chemical speciation & bioavailability. 2015. Vol. 24 (2). P. 65–79. doi: 10.3184/095422912X13338055043100.

17. Maleki M., Ghorbanpour M., Kariman K. Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metal stress // Plant gene. 2017. Vol. 11. P. 247–254. doi: 10.1016/j.plgene.2017.04.006.

18. Rai P.K. Biodiversity of roadside plants and their response to air pollution in an Indo-Burma hotspot region: implications for urban ecosystem restoration // Journal of Asia-Pacific biodiversity. 2015. Vol. 9(1). P. 47–55. doi: 10.1016/j.japb.2015.10.011.

19. Wansha M., Bini C., Fontana S., Wansha A., Zilioli D. Toxicity assessment of contaminated soils from a mining area in Northeast Italy by using lipid peroxidation assay // Journal of geochemical exploration. 2012. Vol. 113. P. 112–117. doi: 10.1016/j.gexplo.2011.09.008

20. Zwolak A., Sarzynska M., Szpyrka E., Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review // Water, air and soil pollution. 2019. Vol. 230. P. 164–175. doi: 10.1007/s11270-019-4221-y.

Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Kritokhin N.A. **Biochemical response of silver birch (*Betula pendula*) to heavy metal accumulation in the urban environment.**

The aim of this study was the search for interrelation between biochemical parameters of silver birch (*Betula pendula* L.) and heavy metal accumulation in Tyumen. Soil and plant samples were collected at the control site, near industrial enterprises and transport hubs of the city. The content of metals in soils and plants was determined by atomic emission spectroscopy. Biochemical parameters (lipid peroxidation products, photosynthetic pigments, flavonoids, catalase activity) were analyzed by visible spectroscopy. Heavy metal accumulation in soil relative to the control decreased in the order: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn. Metal accumulation in birch leaves relative to the control decreased in the

order: Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd. Urban environment pollution led to oxidative processes in birch cells, decrease in flavonoids content and catalase activity. The increase in chlorophyll and carotenoids concentration was the main adaptive mechanism to metal accumulation, while catalase activity was the most sensitive response. The positive correlations between metal concentration and lipid peroxidation products, photosynthetic pigments were established. The concentration of flavonoids and catalase activity negatively correlated with metal content in birch and soil. According to the factor analysis, the degree of metal impact on biochemical parameters decreased in the order: Zn $\approx$ Cu > Cr > Ni $\approx$ Co $\approx$ Pb $\approx$ Cd > Fe $\approx$ Mn.

Keywords: heavy metals; silver birch; lipid peroxidation; antioxidants; photosynthetic pigments.

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

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 11.08.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 25.08.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 06.09.2023

Информация о статье / Information about the article

Петухов Александр Сергеевич – аспирант, ассистент, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, E-mail: revo251@mail.ru.

Кремлева Татьяна Анатольевна – доктор химических наук, директор Института химии, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, E-mail: kreml-ta@yandex.ru.

Петухова Галина Александровна – доктор биологических наук, доцент, профессор, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, E-mail: gpetuhova1@mail.ru.

Хритохин Николай Александрович – кандидат химических наук, доцент, профессор, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, E-mail: kna@utmn.ru.

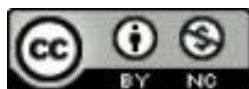
Information about the authors

Alexander S. Petukhov – Postgraduate Student, Assistant, University of Tyumen, 6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia, E-mail: revo251@mail.ru.

Tatyana A. Kremleva – D.Sci. in Chemistry, Head of Institute, University of Tyumen, 6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia, E-mail: kreml-ta@yandex.ru.

Galina A. Petukhova – D.Sci. in Biology, Associate Professor, Professor, University of Tyumen, 6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia, E-mail: gpetuhova1@mail.ru.

Nikolay A. Kritokhin – Ph.D. in Chemistry, Associate Professor, Professor, University of Tyumen, 6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia, E-mail: kna@utmn.ru.



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

Указанные файлы следует переслать в адрес редакции по электронной почте rjaeco@mail.ru или заполнить непосредственно на сайте журнала www.rjae.ru.

Требования к тексту рукописи:

Статьи публикуются на русском и английском языках.

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

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

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

При оформлении статьи следует соблюдать приведенные ниже правила.

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

или альбомной ориентации.

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

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

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

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

В десятичных дробных числах целая часть отделяется от дробной точкой.

Латинские названия видов печатаются курсивом.

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

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

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

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

Образец оформления списка литературы:

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

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

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

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

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

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

Образец оформления транслитерированного списка литературы:

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

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

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

management] / Materialy dokl. VII Vseros. nauchno-prakt. konf. Mahachkala: DGPU, 2019. P. 18–20.

4. Ivancheva E.Yu. Sravnitel'nyj analiz vidovoj struktury rybnogo naseleniya malyh rek Ryazanskoj oblasti [Comparative analysis of the species structure of the fish population of small rivers in the Ryazan region]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) Borok, 2008. 25 p.

5. Safonov A.F. Sistemy zemledeliya [Farming systems]. M.: Kolos, 2006. 447 p.

6. Spirina E.V. K voprosu o biologii foreli ruch'evoy *Salmo trutta morpha fario* [On the biology of brook trout *Salmo trutta morpha fario*] // Priroda Simbirskogo Povolzh'ya [Nature of the Simbirsk Volga]. Ul'yanovsk, 2002. 3. P. 154–157.

7. Yakovlev V.A. Izmenenie struktury zoobentosa severo-vostochnoj Fennoskandii pod vliyaniem prirodnih i antropogennykh faktorov [Changes in the structure of zoobenthos in northeastern Fennoscandia under the influence of natural and anthropogenic factors]: DSc (Dr. of Chem) thesis. Kazan', 1999. 436 p.

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

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

Принятая к рассмотрению статья направляется рецензенту, при наличии замечаний она отсылается авторам на доработку. Окончательное решение о принятии статьи к публикации принимается редколлегией журнала.

Верстка статьи для окончательной проверки и утверждения высылается авторам по электронной почте.





Российский журнал прикладной экологии
420087 г. Казань, ул. Даурская, 28
www.rjae.ru