

16+

ISSN 2311-1402

НИЖНЕВАРТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА



БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

2(66)/2024





ВЕСТНИК НИЖНЕВАРТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА



Журнал основан в 2008 г.

включен в Перечень рецензируемых научных изданий,
утвержденный Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации от 01.12.2015.

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/23-3>

Учредитель: ФГБОУ ВО «Низневартовский
государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по
надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 80105
от 31.12.2020.

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 – 79658
от 27.11.2020.

Подписной индекс АО «Почта России» ПП617

Периодичность издания: 4 раза в год / ежеквартально
Язык издания: русский, английский

Индексируется и размещается: CrossRef,
Российский индекс научного цитирования (РИНЦ),
НЭБ КиберЛенинка (CyberLeninka), ЭБС IPRbooks,
ЭБС «Лань», DOAJ, ZENODO, OpenAIRE, ZDB,
Google Академия, Information Matrix for the Analysis
of Journals (MIAR), Open Academic Journals Index
(OAJI), Polska Bibliografia Naukowa (PBN),
Dimensions, AGRIS, Open Ukrainian Citation Index.

Адрес редакции: Россия, 628616, ХМАО-Югра,
г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56. тел./факс: (3466)
44-39-50, факс: (3466) 45-18-05
e-mail: nvsu@nvsu.ru, red@nvsu.ru

Адрес издательства: Россия, 628616,
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Нижневартовск, ул. Маршала Жукова, д. 4.
Тел./факс: (3466) 24-50-51, e-mail: izd@nvsu.ru

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (по состоянию на 20.07.2022
г.) по специальностям: 1.5.15. Экология (биологические науки), 5.6.1. Отечественная история (исторические науки), 5.6.2.
Всеобщая история (исторические науки), 5.8.7. Методология и технология профессионального образования (педагогические науки)



Тип лицензии CC, поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Издатель: ФГБОУ ВО «Низневартовский государственный университет», Россия, 628605, ХМАО-Югра, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56
Исполнитель: Издательство НВГУ, Россия, 628616, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, ул. Маршала Жукова, д. 4.

ISSN 2311-1402 (Print)
ISSN 2686-8784 (Online)

Подготовлено и отпечатано в изд-ве НВГУ
Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 14.06.2024
Дата выхода 20.06.2024
Формат 60×84 1/8. Гарнитура Times. Усл. печ. листов 4,87.
Тираж 100 экз. Заказ 2311 Цена: бесплатно

Яковлева А.М., выпускающий редактор
Вилявин Д.В., технический редактор

© Нижневартовский государственный университет, 2024





BULLETIN

of NIZHNEVARTOVSK
STATE UNIVERSITY



Bulletin of Nizhnevartovsk State University was founded in 2008

Included in the List of peer-reviewed scientific publications,

approved by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated 01.12.2015

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/23-3>

The journal is published quarterly by the Publishing House of Nizhnevartovsk State University

Registration certificate PI number FS77-80105 on 31.12.2020.

Registration certificate EL number FS77-79658 on 31.12.2020.

Subscription index in the JSC "Russian post"- PP617.

Quarterly

Language of publication: Russian, English

Indexed: CrossRef, Russian Science Citation Index (RSCI), NES Cyber-Leninka (CyberLeninka), EBS IPRbooks, EBS Lan, DOAJ, ZENODO, OpenAIRE, ZDB, Google Academy, Information Matrix for the Analysis of Journals (MIAR), Open Academic Journals Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa (PBN), Dimensions, AGRIS, Open Ukrainian Citation Index.

Editorial address: 628616, Russia, Khanty-Mansiysk Autonomous Area – Yugra, Nizhnevartovsk, Lenin Str., 56. tel./fax: (3466) 44-39-50; (3466) 45-18-05
e-mail: nvsu@nvsu.ru, red@nvsu.ru

Publisher address: 628616, Russia, Khanty-Mansiysk Autonomous Area – Yugra, Nizhnevartovsk, Marshal Zhukov Str., 4, of. 1001. tel.: (3466) 24-50-51,
e-mail: izd@nvsu.ru

Editor-in-Chief: *S.I. Gorlov* (Nizhnevartovsk, Russia)

Deputy Editor: *B.N. Makhutov* (Nizhnevartovsk, Russia)

Executive editor: *E.R. Yumagulova* (Nizhnevartovsk, Russia)

Editorial Board:

V.A. Aikin (Omsk, Russia)

A.A. Voitenko (Moscow, Russia)

S.K. Gboko (Bouake, Côte d'Ivoire)

V.A. Gorshkov-Kantakuzen (Middlesex, UK)

N.M. Daineko (Gomel, Belarus)

L.A. Ibragimova (Nizhnevartovsk, Russia)

A.G. Emanov (Tyumen, Russia)

M.M. Kazansky (Paris, France)

A.Yu. Kulagin (Ufa, Russia)

L.I. Lubysheva (Moscow, Russia)

G.Sh. Maymerova (Bishkek, Kyrgyzstan)

S.S. Medvedev (St. Petersburg, Russia)

B.Zh. Nurbekov (Astana, Kazakhstan)

N.I. Sinyavsky (Surgut, Russia)

Ya.G. Solodkin (Nizhnevartovsk, Russia)

N.N. Surtaeva (St. Petersburg, Russia)

T.G. Talibov (Nakhchivan, Azerbaijan)

P.U. Fatullayev (Nakhchivan, Azerbaijan)

V.V. Tsys (Nizhnevartovsk, Russia)

16+



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ISSN 2311-1402 (Print)

ISSN 2686-8784 (Online)

Prepared and printed in the publishing house of NVGU

Ed. persons. JIP No. 020742. Signed for printing on 14.06.2024

Release date 20.06.2024

Format 60×84 1/8. Times typeface. CONV. print sheets 4.87.

Circulation 100 copies. Order 2311. Free

A.M. Yakovleva, commissioning editor

D.V. Vilyavin, technical editor

© Nizhnevartovsk State University, 2024



СОДЕРЖАНИЕ

Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г. Изменение структуры листа и пигментного комплекса <i>Betula pendula</i> в условиях аэротехногенного загрязнения 4	
Дьякова Н.А. Изучение закономерностей аккумуляции радиоизотопов природного и техногенного происхождения на примере надземной части полыни горькой флоры урбанизированных территорий Центрального Черноземья 15	
Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А. Ответная антиоксидантная реакция травянистых растений различных видов на загрязнение среды тяжелыми металлами .. 25	
Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А. Рдест длиннейший <i>Potamogeton praelongus</i> Wulfen 1805 (Potamogetonaceae) – потенциальный вид для включения в красную книгу Омской области 37	
Чукина Н.В., Глазырина М.А., Лукина Н.В. Анатомо-морфологические особенности строения листа <i>Chimaphila umbellata</i> на промышленных отвалах (Средний Урал) 49	
Рыбка А.Г. Воздействие природного экологического фактора – трематоды <i>Opisthorchis felineus</i> на систему регуляции пролиферативной активности соматических клеток организма .. 61	
Филиппова А.В., Рябухина М.В., Одинокоев Г.Н., Карпова Н.Г. Сравнительный анализ эффективности методов экстракции днк из тканей животных 76	
Рагозин О.Н., Погоньшьева И.А., Шаламова Е.Ю., Погоньшев Д.А., Постникова В.В., Кучумов М.С. Гемодинамические показатели жителей севера, занимающихся моржеванием 86	
Болдырева Е.А., Московченко Д.В. Геохимические особенности верховых торфов бугристых болот ХМАО – Югры 96	
Коренькова О.О. Особенности воздействия факторов окружающей среды на биометрические характеристики высокоможевеловых лесов Крыма 111	
Тхиен Б.Б. Анализ изменения лесного покрова в национальном парке Бен Эн, Вьетнам 123	

CONTENT

S.V. Berentseva, G.G. Borisova, A.V. Sobenin, M.G. Maleva Changes in the Leaf Structure and Pigment Complex of <i>Betula pendula</i> Under Conditions of Technogenic Air Pollution 4	
N.A. Dyakova Studying the Patterns of Accumulation of Radioisotopes of Natural and Man-Made Origin Using the Example of the Aboveground Part of the Wormwood of the Bitter Flora of the Urbanized Territories of the Central Black Earth Region15	
A.S. Petukhov, T.A. Kremleva, G.A. Petukhova, N.A. Khritokhin Antioxidative Response of Herbs of Various Species to Heavy Metal Environmental Pollution25	
B.F. Sviridenko, Yu.A. Murashko <i>Potamogeton Praelongus</i> Wulfen 1805 (Potamogetonaceae) as a Potential Species for Inclusion in the Omsk Region Red Book37	
N.V. Chukina, M.A. Glazyrina, N.V. Lukina Anatomo-Morphological Structure Features of <i>Chimaphila Umbellata</i> Leaf on Industrial Dumps (Middle Ural)49	
A.G. Rybka Impact of Natural Environmental Factor – Trematode <i>Opisthorchis felineus</i> on the System of Regulation of Proliferative Activity of Somatic Cells61	
A.V. Filippova, M.V. Ryabukhina, G.N. Odinokov, N.G. Karpova Comparative Analysis of the Efficiency of Methods for DNA Extraction from Animal Tissues76	
O.N. Ragozin, I.A. Pogonysheva, E.Yu. Shalamova, D.A. Pogonyshev, V.V. Postnikova, M.S. Kuchumov Hemodynamic Indicators of North Residents Engaged in Winter Swimming86	
E.A. Boldyreva, D.V. Moskovchenko Geochemical Features of the Top Peats of the Hummocky Bogs of the KhMAO-Yugra96	
O.O. Koren`kova The Impact of Environmental Factors on the Biometric Characteristics of High Juniper Forests of the Crimea.....111	
B.B. Thien Analysis of Forest Cover Change in Ben En National Park, Vietnam123	

УДК 574.24

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/01>

Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛИСТА И ПИГМЕНТНОГО КОМПЛЕКСА *BETULA PENDULA* В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

S.V. Berentseva, G.G. Borisova, A.V. Sobenin, M.G. Maleva

CHANGES IN THE LEAF STRUCTURE AND PIGMENT COMPLEX OF *BETULA PENDULA* UNDER CONDITIONS OF TECHNOGENIC AIR POLLUTION

Аннотация. Загрязнение атмосферы в условиях городской среды не только нарушает баланс элементов в фитоценозах, но и приводит к изменениям на разных уровнях организации растительных организмов, в том числе затрагивающих их фотосинтетический аппарат. Изучены анатомо-морфологические особенности и содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Betula pendula* Roth, произрастающей в зоне влияния промышленного кластера на территории г. Челябинска (Россия) с разной степенью токсической нагрузки. Было выбрано шесть участков вблизи Челябинского металлургического комбината: пять импактных и один фоновый (северо-западная часть Каштакского бора). По содержанию тяжелых металлов в почве для каждого импактного участка был рассчитан индекс суммарной токсической нагрузки, который в среднем составлял 3,6. Отмечено, что на импактных участках достоверно увеличивалась толщина листовой пластинки (в среднем на 23%), в большей степени за счет палисадного мезофилла и кутикулы верхнего эпидермиса; более того, возрастало количество устьиц, а также величина удельной поверхностной плотности листа (в среднем на 30%), что сопровождалось уменьшением его площади (в среднем на 65%). В условиях повышенной техногенной нагрузки отмечено уменьшение содержания хлорофиллов *a* и *b* (в среднем на 44%), однако соотношение между ними достоверно не изменялось (в среднем 1,75). Каротиноиды оказались более стабильными: их содержание на импактных участках снижалось в меньшей степени. Сделано заключение о значимости компенсаторных перестроек фотосинтетического аппарата *B. pendula* при адаптации к длительному стрессовому воздействию.

Ключевые слова: береза повислая; промышленное загрязнение воздуха; тяжелые металлы; структура

Abstract. Atmospheric pollution in an urban environment not only disrupts the balance of elements in phytocoenoses, but also leads to changes at different levels of organization of plant organisms, including those affecting their photosynthetic apparatus. The anatomical and morphological features as well as photosynthetic pigment content in the leaves of *Betula pendula* Roth, growing in the zone of influence of the industrial cluster in Chelyabinsk (Russia) with varying degrees of toxic load, were studied. Six sites were selected taking into account the wind rose near the Chelyabinsk Metallurgical Plant: five impact and one background (northwestern part of the Kashtaksky pine forest). Based on the content of heavy metals in the soil, the total toxic load index was calculated for each impact site, which averaged 3.6. It was noted that in the impact sites the thickness of the leaf blade significantly increased (on average by 23%), largely due to the palisade mesophyll and upper cuticle. Moreover, the number of stomata increased, as well as the leaf mass per area (by an average of 30%), which was accompanied by a decrease in its area (by an average of 65%). Under conditions of increased technogenic load, a decrease in the content of chlorophylls *a* and *b* was also noted (on average by 44%), but the ratio between them did not change significantly (1.75 on average). Carotenoids turned out to be more stable: their content in impact sites reduced to a lesser extent. The conclusion about the significance of compensatory rearrangements of *B. pendula* photosynthetic apparatus during adaptation to long-term stress has been made.

Keywords: silver birch; industrial air pollution; heavy metals; structure of the

фотосинтетического аппарата; хлорофиллы; каротиноиды.

Сведения об авторах: Беренцева Сусанна Вадимовна, ORCID: 0000-0001-9143-7918, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, berentseva.sus@gmail.com; Борисова Галина Григорьевна, ORCID: 0000-0001-6663-9948, д-р геогр. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, G.G.Borisova@urfu.ru; Собенин Артем Вячеславович, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия, arsob@yandex.ru; Малева Мария Георгиевна, ORCID: 0000-0003-1686-6071, канд. биол. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, maria.maleva@mail.ru

photosynthetic apparatus; chlorophylls; carotenoids.

About the authors: Susanna V. Berentseva, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, berentseva.sus@gmail.com; Galina G. Borisova, ORCID: 0000-0001-6663-9948, Doctor of Geographical Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, G.G.Borisova@urfu.ru; Artem V. Sobenin, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, arsob@yandex.ru; Maria G. Maleva, ORCID: 0000-0003-1686-6071, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, maria.maleva@mail.ru

Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г. Изменение структуры листа и пигментного комплекса *Betula pendula* в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 4-14. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/01>

Berentseva, S.V., Borisova, G.G., Sobenin, A.V., & Maleva, M.G. (2024). Changes in the Leaf Structure and Pigment Complex of *Betula pendula* Under Conditions of Technogenic Air Pollution. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 4-14. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/01>

Введение

Промышленное загрязнение воздуха оказывает негативное влияние на все компоненты окружающей среды и здоровье населения крупных промышленных городов, и, с учетом трансграничного переноса, влияет на соседние территории [21]. Биомониторинг, для которого часто используется урбанофлора, существенно дополняет сведения об экологическом состоянии городских экосистем [1; 15].

В условиях городской среды в тканях растений происходит ряд физиолого-биохимических изменений, по которым можно судить о степени влияния техногенной нагрузки на растения и экосистемы в целом [16; 21]. Для урбанофлоры характерна выраженная пластичность и изменчивость, являющаяся механизмом выживания в нестабильной природной среде городов [1]. Растения могут адаптироваться к неблагоприятным условиям за счет изменения структурных и функциональных характеристик, в том числе фотосинтетического аппарата [5; 14]. Важной характеристикой фотосинтетического аппарата растений при действии различных факторов является состояние пигментного комплекса, поскольку от него зависит интенсивность фотосинтеза и продуктивность растений. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений может использоваться не только как биоиндикатор стресса в условиях

антропогенного воздействия, но и как показатель нарушенности экосистемы в целом [15; 16].

Betula pendula Roth (береза повислая) – легко идентифицируемый вид, удобный для отбора растительных образцов. Береза является одной из самых светолюбивых древесных пород, достаточно засухоустойчива, мало требовательна к почвенному плодородию, отличается высокой семенной продуктивностью и длительным сохранением всхожести семян [12]. Известно, что *B. pendula* играет значительную роль в естественном зарастании техногенно нарушенных территорий в горно-таежной и лесостепной зонах [10; 12]. Различные аспекты, связанные с оценкой структурно-функциональных особенностей этого вида в нарушенных местообитаниях, изучались многими авторами [4; 7; 9-12; 16; 18; 22]. Однако на территории г. Челябинска, где располагаются крупнейшие в России по объему выпускаемой продукции металлургические предприятия [3], комплексных исследований морфофизиологических характеристик *B. pendula* ранее не проводилось.

Цель работы – изучить анатомо-морфологические особенности и содержание фотосинтетических пигментов в листьях *B. pendula*, произрастающей в зоне влияния промышленного кластера на территории г. Челябинска с разной степенью токсической нагрузки.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели было выбрано шесть участков вблизи Челябинского металлургического комбината (ЧМК) и других сопутствующих предприятий производства стали и прокатных изделий, пять импактных: У1 – шлакоотвал, непосредственно прилегающий к ЧМК; У2 – дорога к Челябинскому аэропорту, около 3 км от ЧМК; У3 – дорога возле карьера, между ЧМК и Челябинским заводом стройиндустрии «Кемма»; У4 – дорога рядом с рекультивированной свалкой, около 4 км от ЧМК; У5 – грунтовая дорога за аэропортом, около 5 км от ЧМК; и один фоновый, К – северо-западная часть Каштакского бора (рис. 1). Каштакский бор, выбранный в качестве фонового участка с учетом розы ветров, является особо охраняемой природной территорией, расположенной на правом берегу реки Миасс, г. Челябинск [6]. По данным Росгидромета, в розе ветров этого города преобладают ветра южного, юго-западного и северо-западного направления, поэтому территория, на которой расположен бор, менее подвержена аэротехногенному воздействию.

На каждом участке в конце июля 2022 года были выбраны три дерева примерно одинакового репродуктивного возраста и высоты. С южной экспозиции кроны на высоте 1,5–2,0 м отбирали по 20 листьев срединной формации с каждого дерева. Параллельно на каждом участке отбирали почвенные образцы (до 20 см глубиной) для определения содержания тяжелых металлов (ТМ). Отбор растительных и почвенных образцов проводили в дневные часы при сходных метеорологических условиях (ясный, солнечный день).

Содержание подвижных форм ТМ определяли в 3-кратной повторности из композитной пробы при помощи атомно-абсорбционного спектрометра Varian AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия), после 24-ч экстрагирования 5 %-раствором азотной кислоты (осч.) в соотношении 1:20 (вес:объем). Суммарный индекс токсической нагрузки (Si) рассчитывали по формуле [19]: $Si = (1/n)\Sigma(C_i/C_{\text{фон}})$, где C_i – концентрация металла в почве импактного участка, $C_{\text{фон}}$ – концентрация металла в почве фонового участка, n – число исследованных ТМ.



Рис. 1. Карта Челябинской области и расположение участков отбора проб на территории г. Челябинска: У1–У5 – импактные; К – фоновый

Величину pH почвы определяли в почвенно-водной суспензии в соотношении 1:2,5 (почва: деионизированная вода) с помощью портативного pH-метра/кондуктометра (Hanna Instruments GmbH, Graz, Австрия).

Для изучения структурных характеристик листьев *B. pendula* использовали высечки (0,7 см диаметром), которые затем фиксировали в 70%-этаноле. Поперечные срезы листа делали на замораживающем микротоме МЗ-2 (ОАО ХЗ «Точмедприбор», Украина). Измерение мезоструктурных параметров выполняли в 30-кратной повторности при помощи светового микроскопа Meiji MT 4300 L (Meiji Techno, Япония) с применением программы SIAMS MesoPlant (ООО «СИАМС», Екатеринбург). Площадь листьев рассчитывали путем обработки фотографий 20 листьев с каждого участка в программе JMicroVision, версия 1.2.7.

Удельную поверхностную плотность листа (УППЛ) рассчитывали как отношение сухого веса листовой пластинки к ее площади. Содержание хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически при 470, 649 и

664 нм в смешанных образцах листьев в 4-кратной повторности, после экстрагирования в 95% этаноле, и рассчитывали согласно Lichtenthaler [20].

Для оценки достоверности различий между вариантами использовали непараметрический критерий Краскела–Уоллиса. В таблицах и на рис. 2 представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки (SE). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Почвы всех участков, включая фоновый, отличались повышенным содержанием подвижных форм изученных ТМ, по сравнению с предельно допустимыми и ориентировочно допустимыми концентрациями (ПДК и ОДК, соответственно), что отражает геохимические особенности региона [2; 13]. На фоновом участке содержание Zn, Ni, Mn и Pb было выше допустимых значений в среднем в 2,5 раза, в то время как по кадмию их превышения не отмечено (табл. 1).

Таблица 1

Содержание подвижных форм металлов в почве и суммарный индекс токсической нагрузки

Участок	Содержание металлов в почве, мг/кг сухого веса					
	Zn	Ni	Mn	Cd	Pb	Si
У1	99,8±5,3 ^c	33,7±0,4 ^a	932,6±12,3 ^b	1,0 ± 0,10 ^c	49,3 ± 1,0 ^c	3,0
У2	88,0±0,6 ^c	16,6±0,2 ^c	613,5±7,0 ^d	0,82 ± 0,01 ^c	28,3 ± 0,1 ^d	2,0
У3	168,0±1,3 ^b	22,0±0,2 ^b	1026,0±9,2 ^a	1,64 ± 0,01 ^b	94,8 ± 0,9 ^b	4,1
У4	487,9±3,4 ^a	25,9±0,1 ^b	778,3±6,2 ^c	3,13 ± 0,01 ^a	158,6 ± 0,1 ^a	7,2
У5	69,6±1,3 ^{cd}	18,3±0,7 ^c	332,0±14,7 ^e	0,54 ± 0,02 ^d	31,0 ± 1,7 ^d	1,7
К	47,5±0,1 ^d	8,4±0,1 ^d	391,1±1,5 ^e	0,32 ± 0,02 ^d	14,8 ± 0,2 ^e	1,0
ПДК _{подв.} / ОДК [8]	23/220	4/80	140/–	–/2	6/130	

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 3). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$. У1–У5 – импактные участки; К – фоновый участок; Si – суммарный индекс токсической нагрузки.

В почвах импактных участков содержание цинка составляло от 3ПДК (У5) до 21ПДК (У4), никеля – от 4ПДК (У2) до 8ПДК (У1), марганца – от 2,5ПДК (У5) до 7ПДК (У3). Наибольшему загрязнению кадмием и свинцом подвергался У4, на котором содержание кадмия по сравнению с фоновым участком было выше почти в 10 раз, а свинца – в 11 раз. Суммарный индекс токсической нагрузки на импактных участках в среднем составлял около 3,6. В целом наиболее загрязненными оказались почвы на У3 и У4 (табл. 1).

На содержание подвижных форм ТМ в почве влияет показатель кислотности. Почвы фонового участка были слабокислыми (в среднем pH составляло 6,3), а почвы импактных участков – слабощелочными (в среднем 7,6).

Для листьев *B. pendula* характерен дорсовентральный тип строения мезофилла. В условиях техногенной нагрузки наблюдалось достоверное увеличение толщины листа, в большей степени за счет палисадного мезофилла, а также кутикулы верхнего эпидермиса (табл. 2). Максимальное увеличение толщины листа обнаружено на участке У2 – на 36%

выше по сравнению с фоном. При этом также возрастало количество устьиц: в среднем на 30% по сравнению с фоном, максимум – на 62%. Кроме того, на всех импактных участках у *B. pendula* наблюдалось достоверное уменьшение площади листа, в среднем в 1,7 раза.

Одним из важнейших показателей активности физиологических процессов в растении является УППЛ, значение которого в листьях *B. pendula* на импактных участках было в среднем на 30% выше по сравнению с фоновым. Максимальной величиной УППЛ отличались деревья на У5 (табл. 2).

Таблица 2

Структурные характеристики листа *Betula pendula*

Параметры	Участок					
	У1	У2	У3	У4	У5	К
Толщина листа, мкм	161,3±8,2 ^b	193,0±12,9 ^a	185,2±13,6 ^a	150,1±3,7 ^{bc}	180,5±7,4 ^{ab}	141,4±6,2 ^c
Толщина кутикулы ВЭ, мкм	8,6±0,7 ^a	8,5±1,7 ^a	7,4±0,9 ^{ab}	7,7±0,9 ^{ab}	7,3±0,6 ^{ab}	6,3±0,5 ^{bc}
Толщина ВЭ, мкм	16,9±1,6 ^b	24,2±2,3 ^a	18,9±2,1 ^b	17,7±2,1 ^b	23,6±2,3 ^a	16,2±1,5 ^b
Толщина НЭ, мкм	12,9±0,9 ^{bc}	17,6±1,6 ^a	14,3±1,5 ^b	13,2±0,9 ^{bc}	14,6±1,3 ^b	11,2±1,3 ^c
Общая толщина мезофилла, мкм	124,6±8,0 ^{bc}	139,2±9,4 ^{ab}	141,9±3,2 ^a	110,2±3,9 ^c	133,9±6,1 ^{ab}	105,9±6,1 ^c
Толщина ПМ, мкм	40,9±4,3 ^{ab}	43,4±2,9 ^{ab}	41,0±3,2 ^{ab}	36,9±2,7 ^{bc}	44,1±2,7 ^a	31,36±2,1 ^c
Площадь листа, см ²	17,5±2,9 ^{bc}	12,6±1,2 ^c	18,4±2,4 ^b	15,6±2,9 ^{bc}	14,9±1,5 ^{bc}	26,1±2,8 ^a
Количество устьиц на НЭ, шт.	62,4±1,1 ^a	54,5±0,8 ^b	37,3±0,5 ^c	46,1±0,6 ^b	47,7±1,0 ^b	38,5±1,0 ^c
УППЛ, мг/дм ²	570,7±14,3 ^c	659,9±9,4 ^b	534,2±15,0 ^c	562,9±11,8 ^c	719,5±20,1 ^a	470,2±6,3 ^d

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 30). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$. У1–У5 – импактные участки; К – фоновый участок; ВЭ – верхний эпидермис; НЭ – нижний эпидермис; ПМ – палисадный мезофилл; УППЛ – удельная поверхностная плотность листа.

Структурные характеристики листьев *B. pendula* на техногенно нарушенных территориях изучались ранее и другими авторами [12; 18]. У *B. pendula*, произрастающей на золоотвалах Среднеуральской ГРЭС [12], величина УППЛ достигала 725 мг/дм², а толщина листа – 188 мкм, что близко к значениям, отмеченным на импактных участках У2, У3 и У5. Согласно Kalashnikova et al. [18], показатель УППЛ у *B. pendula* на золоотвалах почти достигал 600 мг/дм², а толщина листа колебалась от 170 до 180 мкм.

Как известно, процесс фотосинтеза зависит от многих внешних факторов. Фотосинтетические пигменты чувствительны к негативному влиянию окружающей среды и подвержены разрушению в условиях техногенного стресса [14]. Содержание Хл *a* и *b* в листьях *B. pendula* на всех импактных участках было достоверно ниже фонового значения (в среднем на 47 и 40%, соответственно), в то время как содержание каротиноидов достоверно снижалось лишь на У3 (рис. 2А, Б). Снижение фотосинтетической способности ассимиляционного аппарата у *B. pendula* и других видов древесных растений в городской среде было отмечено и ранее [9–11]. Известно, что древесные растения могут усваивать и

вовлекать в метаболизм различные газообразные загрязнители, при этом в листьях наблюдается снижение уровня содержания фотосинтетических пигментов [5; 14].

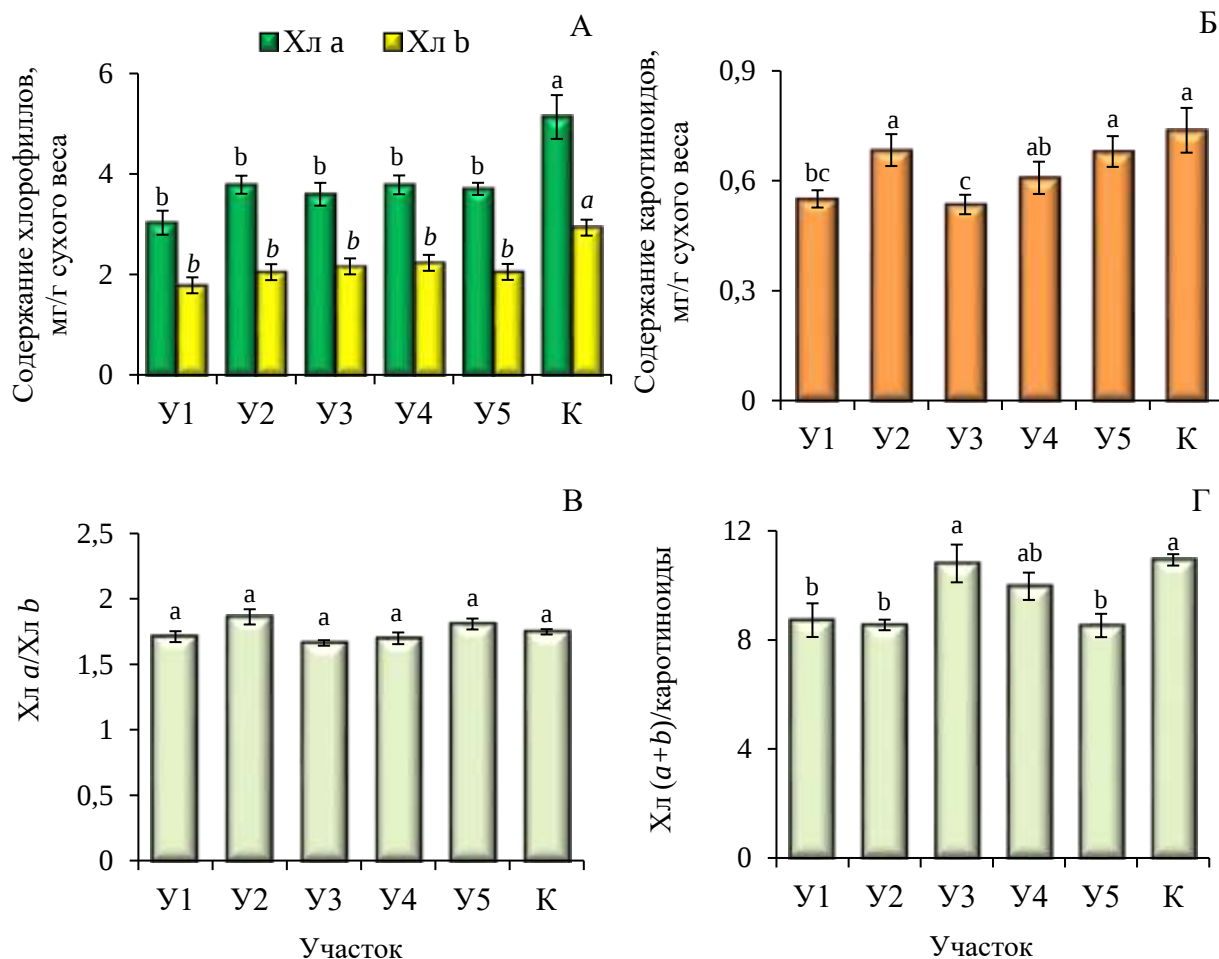


Рис. 2. Содержание (А, Б) и соотношение (В, Г) фотосинтетических пигментов в листьях *Betula pendula*: Y1–Y5 – на импактных участках; К – на фоновом участке. Представлены средние арифметические значения $\pm$ SE ($n = 4$). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$

Одной из важных характеристик пигментного комплекса является соотношение фотосинтетических пигментов, по которому можно судить об адапционных процессах фотосинтетического аппарата. Соотношение $\text{Хл а}/\text{Хл b}$ было сравнительно низким и в среднем составляло 1,75 (рис. 2В), что свидетельствует о важной роли Хл b в поглощении солнечной энергии. При этом аэротехногенное загрязнение на импактных участках не влияло на этот показатель. Соотношение $\text{Хл (a+b)}/\text{каротиноиды}$, характеризующее в целом светособирающую функцию фотосинтетических пигментов, достоверно снижалось лишь на импактных участках Y1, Y2 и Y5 по сравнению с фоновым (рис. 2Г). Уменьшение этого показателя в условиях техногенной нагрузки свидетельствует о стабильности каротиноидов, которые играют важную роль не только как фотопротекторы, но и антиоксиданты, участвующие в защите от окислительного стресса [17].

Заключение

Изменение морфофизиологических характеристик древесных растений в условиях городской среды является ответной реакцией на комплекс негативных факторов природного и антропогенного характера. В условиях техногенной нагрузки в листьях *Betula pendula* были отмечены структурные перестройки фотосинтетического аппарата, проявляющиеся в увеличении толщины листа за счет хлорофиллоносной части мезофилла, компенсирующей сокращение его ассимиляционной поверхности, а также кутикулы верхнего эпидермиса. При этом возрастание толщины кутикулы, по-видимому, играет защитную роль в условиях аэротехногенного загрязнения. Несмотря на существенное уменьшение содержания хлорофиллов *a* и *b* на импактных участках, их соотношение достоверно не изменялось. Более высокая стабильность каротиноидов, по сравнению с хлорофиллами, вероятно, свидетельствует о защитной роли пигментов-антиоксидантов. В целом, такие адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата берёзы, возможно, поддерживают фотосинтетическую продуктивность деревьев в условиях городской среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FEUZ-2024-0011.

Литература

1. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 206 с.
2. Даванков А.Ю., Гордеев С.С., Двинин Д.Ю. Экологическая оценка городских территорий // Известия высших учебных заведений. Уральский регион. 2015. № 2. С. 43-49.
3. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2022 году. Челябинск: Министерство экологии Челябинской области, 2023. 208 с.
4. Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Мумбер А.Г., Чащина О.Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината. Агрохимия. 2015. № 3. С. 88-96.
5. Мокроносов А.Т. Фотосинтез. Физиолого-эколого-биохимические аспекты. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 448 с.
6. Назаренко Н.Н. Растительность и биотопы регионального ботанического памятника природы «Каштакский бор» (Сосновский район Челябинской области) // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11. № 4. С. 85-90.
7. Неверова О.А., Быков А.А. Оценка адаптивного потенциала *Betula pendula* Roth в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 551-551.
8. Перечень предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве. Издание специальное. М.: Изд-во Госкомсанэпиднадзора России, 1991. 18 с.
9. Сидоренко М.В., Юнина В.П., Ерофеева Е.А., Савинов А.Б., Кузнецов М.Д., Новожилов Д.А. Оценка экологического состояния рекреационных зон г. Нижнего Новгорода по уровням

загрязнения почв тяжелыми металлами и биоиндикационным показателям листьев *Betula pendula* Roth // Самарский научный вестник. 2020. Т. 8. № 1(30). С. 88-92.

10. Соколова Г.Г. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19. № 1. С. 223-228.

11. Уразгильдин Р.В., Аминев К.З., Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю., Яшин Д.А. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения // Карельский научный журнал. 2016. Т. 5. № 1(14). С. 90-94.

12. Чукина Н.В., Филимонова Е.И., Файрузова А.И., Борисова Г.Г. Морфофизиологические особенности листьев *Betula pendula* Roth на золоотвалах Среднего Урала. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. Т. 6(159). С. 68-75.

13. Шабанов М.В., Стрекулев Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. №1. С. 184-192. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3011>

14. Ashraf M., Harris P.J.C. Photosynthesis under stressful environments: An overview // Photosynthetica. 2013. Vol. 51. P. 163-190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>

15. Bussotti F., Pollastrini M. Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits // Ecological indicators. 2015. Vol. 52. P. 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.010>

16. Czaja M., Kołton A., Baran A., Muszyńska E., Muras P. Physiological responses of *Betula pendula* Roth growing in polluted areas // Ecological Questions. 2015. Vol. 22. P. 39-46. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2015.021>

17. Dymova O., Lashmanova E., Golovko T. Plant pigments and human health. In T.K. Golovko, W. I. Gruszecki, M.N.V. Prasad & K. Strzalka, eds. *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology*, pp. 423-438. Syktyvkar. Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014.

18. Kalashnikova I.V., Migalina S.V., Ronzhina D.A., Ivanov, L.A., Ivanova L.A. Functional response of *Betula* species to edaphic and nutrient stress during restoration of fly ash deposits in the Middle Urals (Russia) // Environmental Science and Pollution Research, 2021, Vol. 28. P. 12714-12724. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11200-5>

19. Kumar A., Tripti, Raj D., Maiti S.K., Maleva M., Borisova G. Soil pollution and plant efficiency indices for phytoremediation of heavy metal(loid)s: two-decade study (2002–2021) // Metals. 2022. Vol. 12. 1330. <https://doi.org/10.3390/met12081330>

20. Lichtenhaler H.K., Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

21. Nadgórska-Socha A., Kandziora-Ciupa M., Trzęsicki M., Barczyk G. Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes // *Chemosphere*. 2017. Vol. 183. P. 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>

22. Pajak M., Halecki W., Gąsiorek M. Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach // *Chemosphere*. 2017. Vol. 168. P. 851–859. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.125>

References

1. Buxarina, I.L., Zhuravleva, A.N., & Boly'shova, O.G. (2012). *Gorodskie nasazhdeniya: e`kologicheskij aspekt*. Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universitet». (in Russ.)

2. Davankov, A.Yu., Gordeev, S.S., Dvinin, & D.Yu. (2015). E`kologicheskaya ocenka gorodskix territorij. *Izvestiya vy'sshix uchebny`x zavedenij. Ural'skij region*, 2, 43-49. (in Russ.).

3. Doklad ob e`kologicheskoy situacii v Chelyabinskoj oblasti v 2022 godu. (2023). *Ministerstvo e`kologii Chelyabinskoj oblasti*, 208. (in Russ.).

4. Koroteeva, E.V., Veselkin, D.V., Kuyanceva, N.B., Mumber, A.G., & Chashhina, O.E. (2015). Nakoplenie tyazhely`x metallov v razny`x organax berezy` povisloj voze Karabashskogo medeplavil`nogo kombinata. *Agroximiya*, 3, 88-96. (in Russ.).

5. Mokronosov, A.T. (2006). *Fotosintez. Fiziologo-e`kologo-bioximicheskie aspekty*. M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 448. (in Russ.).

6. Nazarenko, N.N. (2022). Rastitel`nost` i biotopy` regional`nogo botanicheskogo pamyatnika prirody` «Kashtakskij bor» (Sosnovskij rajon Chelyabinskoj oblasti). *Samarskij nauchny`j vestnik*, 11(4), 85-90. (in Russ.).

7. Neverova, O.A., & By`kov, A.A. (2015). Ocenka adaptivnogo potentsiala *Betula pendula* Roth v usloviyax preobladayushhego vliyaniya vy`brosov promzony` g. Kemerovo. *Sovremennye problemy` nauki i obrazovaniya*, 2-1, 551-551. (in Russ.).

8. Perechen` predel`no-dopustimy`x koncentracij (PDK) i orientirovochno-dopustimy`x kolichestv (ODK) ximicheskix veshhestv v pochve (1991). *Izdanie special`noe*. M.: Izd-vo Goskomsane`pidnadzora Rossii. (in Russ.).

9. Sidorenko, M.V., Yunina V.P., Erofeeva, E.A., Savinov, A.B., Kuznecov, M.D., & Novozhilov, D.A. (2020). Ocenka e`kologicheskogo sostoyaniya rekreacionny`x zon g. Nizhnego Novgoroda po urovnyam zagryazneniya pochv tyazhely`mi metallami i bioindikacionny`m pokazatelyam list`ev *Betula pendula* Roth. *Samarskij nauchny`j vestnik*, 8, 1(30), 88-92. (in Russ.).

10. Sokolova, G.G. (2020). Vliyanie texnogennoho zagryazneniya na pigmentny`j sostav list`ev berezy` povisloj (*Betula pendula* Roth) v usloviyax goroda Barnaula. *Problemy` botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii*, 19, 1, 223-228. (in Russ.).

11. Urazgil`din, R.V., Amineva, K.Z., Zajcev, G.A., Kulagin, A.Yu., & Yashin, D.A. (2016). Sravnitel`naya xarakteristika formirovaniya pigmentnogo kompleksa duba chereschatogo (*Quercus robur* L.), lipy` serdcevidnoj (*Tilia cordata* Mill.) i berezy` povisloj (*Betula pendula* Roth) v usloviyax promy`shlennogo zagryazneniya. *Karel'skij nauchny`j zhurnal*, 5, 1(14), 90-94. (in Russ.).

12. Chukina, N.V., Filimonova, E.I., Fajruzova, A.I., & Borisova, G.G. (2016). Morfofiziologicheskie osobennosti list'ev *Betula pendula* Roth na zolootvalax Srednego Urala. *Ucheny'e zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 6(159), 68-75. (in Russ.).
13. Shabanov, M.V., & Strekulev, G.B. (2021). Geoximicheskie processy` nakopleniya tyazhely`x metallov v landshaftax Yuzhnogo Urala. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 332(1), 184-192. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3011> (in Russ.).
14. Ashraf, M., & Harris, P.J.C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51, 163-190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
15. Bussotti, F., & Pollastrini, M. (2015). Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits. *Ecological indicators*, 52, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.010>
16. Czaja, M., Kołton A., Baran, A., Muszyńska, E., & Muras, P. (2015). Physiological responses of *Betula pendula* Roth growing in polluted areas. *Ecological Questions*, 22, 39-46. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2015.021>
17. Dymova, O., Lashmanova, E., & Golovko, T. (2014). Plant pigments and human health. In T. K. Golovko, W. I. Gruszecki, M.N.V. Prasad & K. Strzalka (Eds.). *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology*, pp. 423-438. Syktyvkar. Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. (in Russ.).
18. Kalashnikova, I.V., Migalina, S.V., Ronzhina, D.A., Ivanov, L.A., & Ivanova, L.A. (2021). Functional response of *Betula* species to edaphic and nutrient stress during restoration of fly ash deposits in the Middle Urals (Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 12714-12724. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11200-5> (in Russ.).
19. Kumar, A., Tripti, Raj D., Maiti, S.K., Maleva, M., & Borisova G. (2022). Soil pollution and plant efficiency indices for phytoremediation of heavy metal(loid)s: two-decade study (2002–2021). *Metals*, 12, 1330. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127799>
20. Lichtenhaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
21. Nadgórska-Socha, A., Kandziora-Ciupa, M., Trzęsicki, M., & Barczyk, G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, 183, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>
22. Pająk, M., Halecki, W., & Gąsiorek, M. (2017). Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach. *Chemosphere*, 168, 851-859. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.125>

дата поступления: 21.02.2024

дата принятия: 27.04.2024

© Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г., 2024

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АККУМУЛЯЦИИ РАДИОИЗОТОПОВ
ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ
НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ПОЛЫНИ ГОРЬКОЙ ФЛОРЫ УРБАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ**

N.A. Dyakova

**STUDYING THE PATTERNS OF ACCUMULATION OF RADIOISOTOPES
OF NATURAL AND MAN-MADE ORIGIN USING THE EXAMPLE
OF THE ABOVEGROUND PART OF THE WORMWOOD OF THE BITTER FLORA
OF THE URBANIZED TERRITORIES OF THE CENTRAL BLACK EARTH REGION**

Аннотация. Радионуклиды в настоящий момент к наиболее опасным экотоксикантов, в силу их высокой устойчивости, широкого распространения, способности к биогенным миграциям и кумуляции в живых организмах. Целью настоящего исследования являлось изучение закономерностей аккумуляции радионуклидов природного и техногенного происхождения в синантропной флоре Воронежской области на примере надземной части полыни горькой (*Artemisia absinthium* L.). Все изученные образцы растительного сырья, заготовленные в естественных и искусственных фитоценозах Воронежской области, соответствует существующим требованиям радиационной безопасности (первая группа). Корреляционный анализ удельной активности природных и техногенных радионуклидов в почве и надземной части полыни горькой показал наличие тесной взаимосвязи между данными числовыми показателями, что подтвердило преимущественное транспочвенное их загрязнение. Полученные результаты исследования показали, что при увеличении удельной активности природных и техногенных радионуклидов в почве возрастала их удельная активность в надземной части полыни горькой. Коэффициенты накопления стронция-90, цезия-137, калия-40 из почв в надземной части полыни горькой имели тенденцию к снижению по мере увеличения удельной активности радионуклидов в почве, что указывает на наличие физиологических механизмов регуляции их поступления в растение, а тория-232, радия-226 – напротив, возрастали, что свидетельствует о высоких фиторемедиационных способностях вида в отношении данных изотопов. Впервые выявленные в результате исследования закономерности и математические зависимости накопления техногенных и природных радионуклидов в надземной части полыни горькой позволяют

Abstract. Radionuclides are currently to the most dangerous ecotoxicants, due to their high resistance, wide distribution, ability to biogenic migration and cumulation in living organisms. The purpose of this study was to study the patterns of accumulation of radionuclides of natural and man-made origin in the synanthropic flora of the Voronezh region using the example of the aboveground part of bitter wormwood (*Artemisia absinthium* L.). All studied samples of plant raw materials prepared in natural and artificial phytocenoses of the Voronezh region meet the existing radiation safety requirements (first group). Correlation analysis of the specific activity of artificial and natural radionuclides in the soil and the aboveground part of the bitter wormwood showed a close relationship between these numerical indicators, which confirmed their predominant transposed pollution. The results of the study showed that with an increase in the specific activity of natural and man-made radionuclides in the soil, their specific activity increased in the above-ground part of the bitter wormwood. The accumulation coefficients of strontium-90, cesium-137, potassium-40 from soils in bitter wormwood grass tended to decrease as the specific activity of radionuclides in the soil increased, indicating the presence of physiological mechanisms for regulating their entry into the plant, and thorium-232, radium-226, on the contrary, increased, which indicates high phytoremediation abilities of the species in relation to these isotopes. For the first time, the patterns and mathematical dependencies of the accumulation of technogenic and natural radionuclides in bitter wormwood grass revealed as a result of the study make it possible

прогнозировать особенности загрязнения растительного сырья данными экотоксикантами.

Ключевые слова: Воронежская область; растительное сырье; стронций-90; цезий-137; торий-232; калий-40; радий-226.

Сведения об авторе: Дьякова Нина Алексеевна, д-р фармацевт. наук, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, Ninochka_V89@mail.ru

to predict the peculiarities of contamination of plant raw materials with these ecotoxics.

Keywords: Voronezh region; herbal raw materials; strontium-90; cesium-137; thorium-232; potassium-40; radium-226.

About the author: Nina A. Dyakova, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Voronezh State University, Voronezh, Russia, Ninochka_V89@mail.ru

Дьякова Н.А. Изучение закономерностей аккумуляции радиоизотопов природного и техногенного происхождения на примере надземной части полыни горькой флоры урбанизированных территорий Центрального Черноземья // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 15-24. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/02>

Dyakova, N.A. (2024). Studying the Patterns of Accumulation of Radioisotopes of Natural and Man-Made Origin Using the Example of the Aboveground Part of the Wormwood of the Bitter Flora of the Urbanized Territories of the Central Black Earth Region. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 15-24. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/02>

Введение. Радионуклиды в настоящий момент относятся к наиболее опасным экотоксикантам, в силу их высокой устойчивости, широкого распространения, способности к биогенным миграциям и кумуляции в живых организмах. Учитывать особенности накопления в лекарственном растительном сырье (ЛРС) радионуклидов необходимо, так как некоторые растения способны проявлять способность к аккумуляции данных экотоксикантов, как техногенного (цезия-137 (Cs-137), стронций-90 (Sr-90)), так и природного происхождения (торий-232 (Th-232), радий-226 (Ra-226), калий-40 (K-40)), активно мигрирующих по биологической цепи «почва → ЛРС → лекарственный препарат → организм человека» [1; 22].

Работы, касающиеся оценки качества ЛРС Воронежской области, относящегося к стратегически важным районам растениеводства, в настоящее время единичны и несистематизированы. В предшествующих отечественных и зарубежных экологических исследованиях ЛРС показана различная тропность лекарственных растений к аккумуляции поллютантов из почв, приводимые данные сильно разнятся, что может быть связано с особенностями почв, а также способностью растениями аккумулировать некоторые биогенные элементы и блокировать чрезмерное накопление фитотоксичных соединений [6; 10; 16]. Почвы Воронежской области представлены преимущественно черноземами, отличающимися высокими концентрациями гумуса и прочих органических веществ, что обуславливает прочную абсорбцию радиоизотопов [9].

Полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.) является рудеральным синантропным видом, представляющим собой многолетнее травянистое растение. Сырье заготавливается от дикорастущих особей. На территории РФ полынь горькая распространена практически повсеместно, особенно в лесной, лесостепной, степной зонах, активно формирует

фитоценозы при зарастании карьеров и отвалов. Полынь горькая устойчива к засухам и морозам. Относится к эвгалофитам [15; 17; 23].

Анализ литературных данных позволил выявить отдельные экологические исследования качества растительных ресурсов на примере полыни горькой. К настоящему времени подробно изучены особенности накопления токсичных элементов в надземной части (траве) полыни горькой [2; 3; 8; 14; 18-21; 24]. В частности, на примере Воронежской области выявлено, что надземная часть полыни горькой способна аккумулировать некоторые металлы (цинк, медь), если их концентрация в почве ниже жизненно необходимого уровня, а также блокировать их накопление, если содержание металлов в почвах высоко. Это указывает на формирование в условиях техногенного загрязнения и адаптации к данным условиям эдафотипа полыни горькой [8].

Особенности накопления радионуклидов для данного вида практически не изучены. Исследования по накоплению радиоизотопов на примере флоры Белгородской области показали высокую аккумулирующую способность Cs-137 в надземной части полыни горькой (160 Бк/кг) [13].

Цель исследования – изучение закономерностей аккумуляции радионуклидов природного и техногенного происхождения в синантропной флоре Воронежской области на примере надземной части полыни горькой (*Artemisia absinthium* L.).

Материалы и методы исследования. Для исследования использовали разные по характеру антропогенного воздействия территории Воронежской области: промышленные предприятия (рис. 1: 23, 24, 28); теплоэлектроцентраль (рис. 1: 27); атомная электростанция (АЭС) (рис. 1: 8); аэропорт (рис. 1: 30); улица г. Воронежа (рис. 1: 31); высоковольтные линии электропередач (рис. 1: 9); водохранилище (рис. 1: 29); городские населенные пункты (рис. 1: 25, 26); медно-никелевые месторождения (рис. 1: 4); зоны загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС (рис. 1: 5-7); районы активного растениеводства (рис. 1: 10-22); дороги разной степени загруженности: трасса М4 (рис. 1: 32, 34), трасса А144 (рис. 1: 33), проселочная (рис. 1: 35) и железная дороги (рис. 1: 36); зоны контроля: Воронежский биосферный заповедник (рис. 1: 1), Хоперский заповедник (рис. 1: 2), Теллермановский лес (рис. 1: 3).

В качестве объекта исследования использовали надземную часть полыни горькой (*Artemisia absinthium* L.), которую заготавливали в соответствии с ФС. 2.5.0033.15 «Полыни горькой трава», в период цветения растения, аккуратно срезали, сушили теневым способом тонким слоем при хорошей вентиляции, периодически переворачивая. Биомасса каждой пробы (в пересчете на абсолютно сухое сырье) составляла не менее 100 г. Также отбирали пробы поверхностных слоев почвы (0–10 см от поверхности) на всех исследуемых пробных площадках методом конверта [7].

Анализ образцов проводили на спектрометре МКГБ-01 «РАДЭК» (НТИЦ «РАДЭК», Россия). Определение удельной активности радиоизотопов в почве осуществляли по МР 2.6.1/2.3.7.0216-20, в ЛРС – по ОФС.1.5.3.0001 (1 вариант измерений) [21]. Измеряли

удельную активность основных техногенных (Sr-90, Cs-137) и природных (K-40, Ra-226, Th-232) радиоизотопов. Каждое определение проводили троекратно. Полученные результаты измерений обрабатывали статистически при доверительной вероятности 95%.



Рис. 1. Карта-схема отбора образцов почв и надземной части полыни горькой (обозначения описаны в тексте)

Для оценки аккумулирующей активности природных и техногенных радиоизотопов надземной частью полыни горькой из почв рассчитывали коэффициенты накопления (КН):

$$КН = \frac{С_{ЛРС} \cdot 100}{С_{ВСП}},$$

где $С_{ЛРС}$ – удельная активность радиоизотопа в надземной части полыни горькой; Бк/кг

$С_{ВСП}$ – удельная активность радиоизотопа в почве; Бк/кг [6; 9].

Результаты исследования и их обсуждение. Удельная активность Sr-90 в надземной части полыни горькой варьировала в диапазоне 3,7–7,2 Бк/кг, что в значительно (в десятки раз) меньше предела допустимого содержания радионуклида в ЛРС, установленного ГФ XV в 200 Бк/кг. Удельная активность Cs-137, характеризующаяся числовыми значениями 27,6–120,4 Бк/кг, также не превышала установленных норм (400 Бк/кг). Значения суммы показателя соответствия требованиям радиационной безопасности и погрешности его определения для надземной части полыни горькой, составили 0,09–0,33, что не превышало 1,0 и позволило считать все заготовленные на территории Воронежской области образцы надземной части полыни горькой соответствующим критерию радиационной безопасности (первая группа) [5; 11; 12].

Аккумуляция Th-232 в надземной части полыни горькой характеризовалась диапазоном удельной активности 4,5–16,1 Бк/кг. Накопление в надземной части полыни горькой K-40 составило 514–1488 Бк/кг. Удельная активность Ra-226 отмечена на уровне 3,1–10,5 Бк/кг [11].

Корреляционный анализ зависимости удельной активности природных и техногенных радиоизотопов в почве и надземной части полыни горькой (табл.) показал наличие весьма заметной взаимосвязи для K-40, Sr-90, Cs-137, Ra-226, и заметной – для Th-232, что указывает на преимущественное транспочвенное загрязнение ими растительного сырья.

Таблица

Коэффициенты корреляции между показателями удельной активности радиоизотопов в почве и надземной части полыни горькой

Радиоизотоп	Sr-90	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
Коэффициент корреляции	0,86	0,93	0,93	0,94	0,60

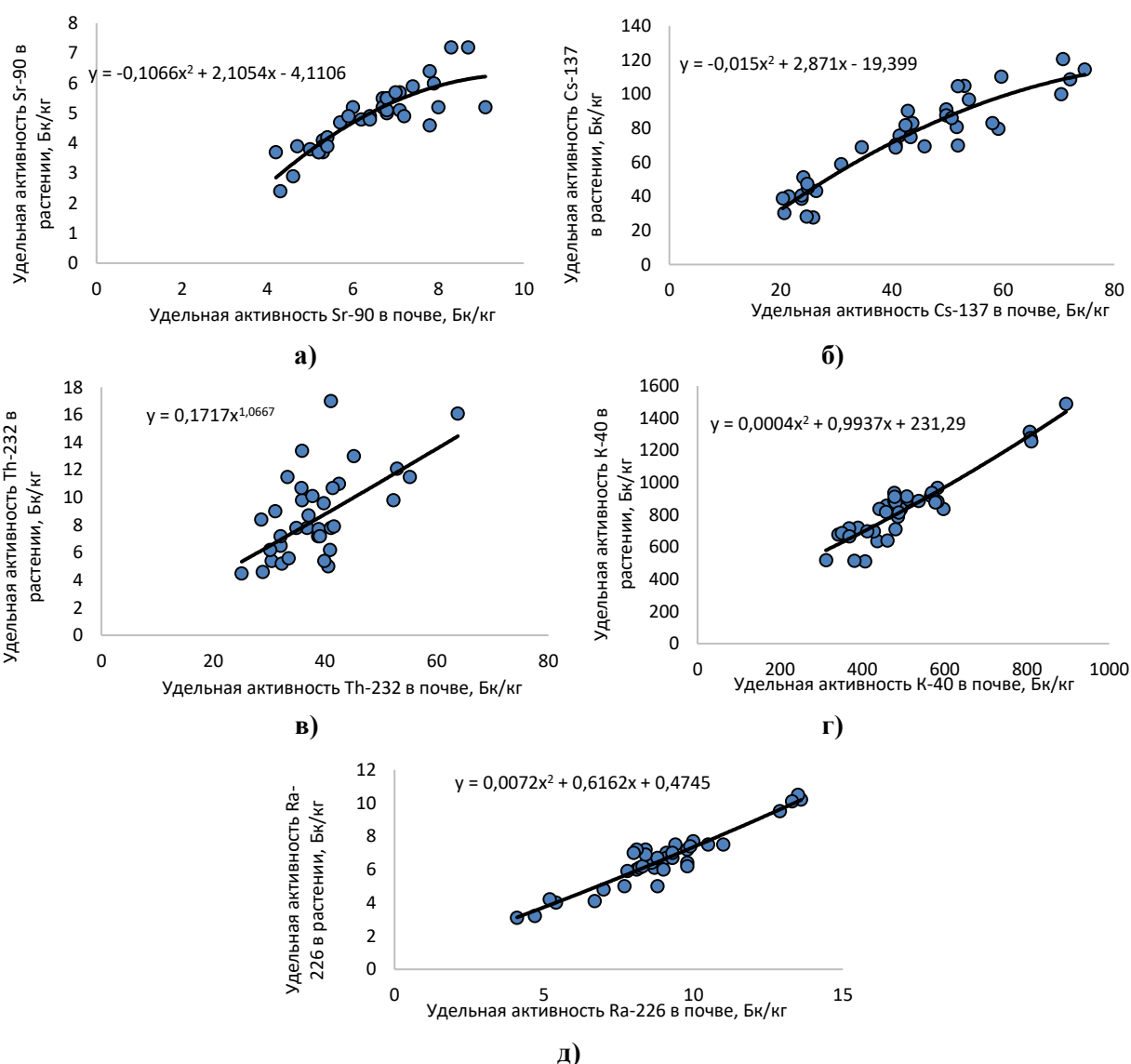


Рис. 2. Зависимость удельной активности радиоизотопов в надземной части полыни горькой от удельной активности их в почве (а - Sr-90, б - Cs-137, в - Th-232, г - K-40, д – Ra-226)

Анализ рисунка 2 показывает, что при возрастании удельной активности природных и техногенных радиоизотопов в почве увеличивалась их удельная активность в надземной части полыни горькой. Закономерности накопления определяемых радиоизотопов описаны математическими зависимостями.

Анализ коэффициентов накопления природных и техногенных радионуклидов в надземной части полыни горькой показал способность данного вида к аккумуляции Cs-137 и K-40 из почв. Коэффициенты накопления Cs-137 составляли 1,07–2,12, K-40 – 1,35–1,98, что объясняется одинаковым механизмом накопления данных изотопов из почвы – по калиевым каналам [1]. Сходный характер аккумуляции в надземной части полыни горькой также отмечен для двухвалентных радиоизотопов – Ra-226 и Sr-90. Коэффициенты накопления Sr-90 составили 0,56–0,87, Ra-226 – 0,61–0,89. Относительно невысокие коэффициенты накопления в надземной части полыни горькой отмечены для Th-232: от 0,11 до 0,30 [4; 11].

Коэффициенты накопления K-40, Sr-90, Cs-137 в надземной части полыни горькой (рис. 3) снижались по мере увеличения удельной активности радиоизотопов в почве [1; 10]. Коэффициенты накопления Ra-226 и Th-232 увеличивались при возрастании удельной активности радионуклидов в почве, что свидетельствует о высоких фиторемедиационных способностях вида в отношении данных природных радиоизотопов.

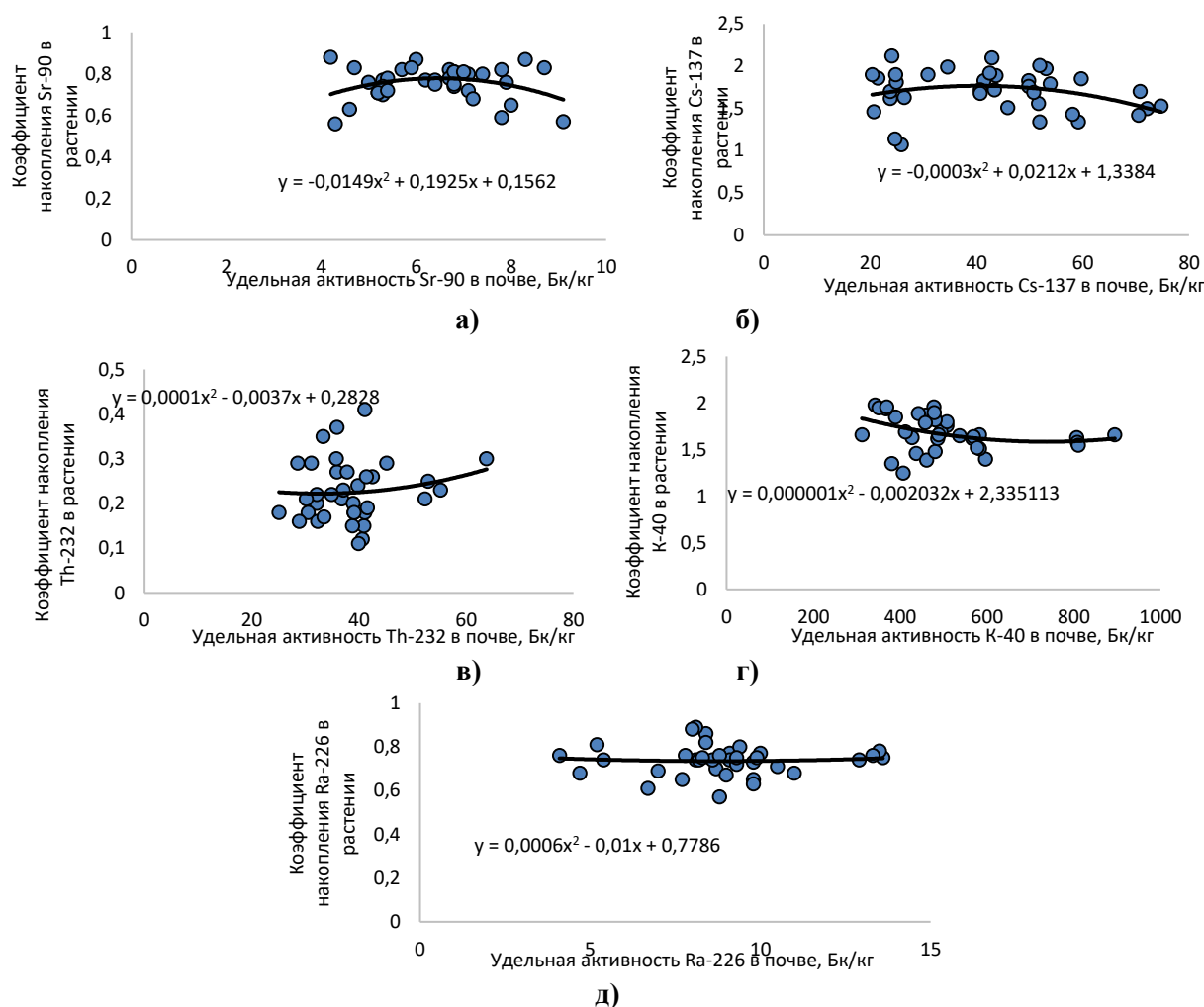


Рис. 3. Зависимость коэффициентов накопления радиоизотопов в надземной части полыни горькой от удельной активности их в почве (а - Sr-90, б - Cs-137, в - Th-232, г - K-40, д - Ra-226)

Выводы. Таким образом, изучено накопление природных и техногенных радионуклидов надземной частью полыни горькой, заготовленной в искусственных и естественных фитоценозах Воронежской области. Все исследуемое растительное сырье соответствует требованиям радиационной безопасности (первая группа). Отмечено, что при увеличении удельной активности природных и техногенных радиоизотопов в почве возрастала их удельная активность в надземной части полыни горькой. Коэффициенты накопления K-40, Sr-90, Cs-137 из почв в надземной части полыни горькой уменьшались по мере увеличения удельной активности радионуклидов в почве, а Ra-226 и Th-232 – напротив, возрастали, что свидетельствует о высоких фиторемедиационных способностях вида в отношении данных природных радиоизотопов. Впервые выявленные в результате исследования закономерности и математические зависимости накопления техногенных и природных радионуклидов в надземной части полыни горькой позволяют прогнозировать особенности загрязнения растительного сырья данными экотоксикантами.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00272,
<https://rscf.ru/project/24-27-00272>*

Литература

1. Бекман И.Н. Радиоэкология и экологическая радиохимия. Москва: Издатель Мархотин П.Ю., 2018. 400 с.
2. Белозерова Т.И., Бойкова Т.Е., Прахова С.В. Диагностика содержания ионов тяжелых металлов и радионуклидов в почвах г. Северодвинска // Современные традиции развития науки и технологии. Периодический научный сборник. 2016. № 2. С. 110-114.
3. Ботов А.Ю., Северин А.П., Яцюк В.Я., Сипливая Л.Е. Элементный состав некоторых растений семейства Asteraceae // Научные ведомости. Серия Медицина. Фармация. 2011. № 22. С. 164-166.
4. Гапонов С.П., Сливкин А.И., Дьякова Н.А. Изучение особенностей накопления радионуклидов травой полыни горькой // Пути и формы совершенствования фармацевтического образования. Создание новых физиологически активных веществ: Материалы 6-й Международной научно-методической конференции «Фармобразование-2016». Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2016. С. 232-236.
5. Государственная фармакопея Российской Федерации. Издание XV. <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15>
6. Дьякова Н.А. Изучение накопления радионуклидов лекарственным растительным сырьем Центрального Черноземья // Вестник Смоленской Государственной Медицинской Академии. 2022. Т. 21. № 3. С. 171-176.
7. Дьякова Н.А. Методические рекомендации по заготовке лекарственного растительного сырья в Воронежской области. Воронеж: Издательский Дом ВГУ, 2022. 160 с.

8. Дьякова Н.А. Накопление тяжелых металлов и мышьяка травой полыни горькой // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20. № 4. С. 445-453.
9. Дьякова Н.А. Экологическая оценка сырьевых ресурсов лекарственных растений Воронежской области. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. 264 с.
10. Дьякова Н.А. Эколого-фармакогностическая оценка радионуклидного загрязнения лекарственного растительного сырья Воронежской области. Москва: Русайнс, 2023. 188 с.
11. Дьякова Н.А., Сливкин А.И., Гапонов С.П. Оценка радионуклидного загрязнения лекарственного растительного сырья в Центральном Черноземье на примере травы полыни горькой // Вопросы обеспечения качества лекарственных средств. 2019. № 3(25). С. 36-44.
12. Дьякова Н.А., Уколова И.Р. Содержание радионуклидов в траве полыни горькой, собранной в Центральном Черноземье // Материалы 65-й Всероссийской межвузовской студенческой научной конференции с международным участием «Молодежь, наука, медицина». Тверь: Редакционно-издательский центр Тверского государственного медицинского университета. 2019. С. 324-327.
13. Колчанов Р.А., Колчанов А.Ф. Содержание цезия-137 в лекарственных растениях на территории Белгородской области // Научные ведомости БелГУ. 2009. № 11(66). С. 14-17.
14. Королёв А.С., Гладышев А.А., Юткина И.С. Особенности накопления биоэлементов в надземной части *Artemisia absinthium* L. на шламовом поле криолитового завода // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 5(49). С. 159-161.
15. Куркин В.А. Фармакогнозия. Самара: Офорт, 2004. 1174 с.
16. Куролап С.А., Мамчик Н.П., Клепиков О.В. и др. Медико-экологический атлас Воронежской области. Воронеж: Воронежская областная типография, 2010. 167 с.
17. Кьосев П.А. Лекарственные растения: самый полный справочник. Москва: Эксмо-Пресс, 2011. 939 с.
18. Любимов В.Б., Анищенко Л.Н., Борздыко Е.В., Маркелова Н.В., Поцепай Ю.Г., Сковородникова Н.А., Азарченкова Е.А., Мокрогузова В.Н. Итоги разработки системы биоанализа на региональной основе в мониторинге сред обитания // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. 2011. № 1(2). С. 49-60.
19. Милютин Н.О., Осмоловская Н.Г., Политаева Н.А., Куриленко В.В. Анализ миграции тяжелых металлов в системе «почва–растение» при эколого-геологической оценке окружающей среды вокруг полигона ТКО в г. Тамбов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 3. С. 55-63.
20. Позняк С.С. Содержание некоторых тяжелых металлов в растительности полевых и луговых агрофитоценозов в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 1. С. 13-19.
21. Попп Я.И., Бокова Т.И. Содержание цинка, меди и кадмия в различных видах лекарственных растений, произрастающих в поймах рек Иртыша и Оби // Вестник НГАУ. 2017. № 1(42). С. 84-92.

22. Терешкина О.И., Рудакова И.П., Самылина И.А. Оценка риска радионуклидного загрязнения лекарственного растительного сырья // Фармация. 2011. № 7. С. 3-6.

23. Цвелев Н.Н. Определитель сосудистых растений Северо – Западной России. СПб.: Изд-во СПУВА, 2000. 781 с.

24. Чибрик Т.С. Изменчивость микроэлементного состава *Artemisia absinthium* L. // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2014. № 11. С. 106-113.

References

1. Bekman, I.N. (2018). *Radioe`kologiya i e`kologicheskaya radioximiya*. Moskva: Izdatel` Marxotin P.Yu., 400. (in Russ.).

2. Belozerova, T.I., Bojkova, T.E., & Praxova, S.V. (2016). Diagnostika sodержaniya ionov tyazhely`x metallov i radionuklidov v pochvax g. Severodvinska. *Sovremennyy`e tradicii razvitiya nauki i tekhnologii*. Periodicheskiy nauchny`j sbornik, 2, 110-114. (in Russ.).

3. Botov, A.Yu., Severin, A.P., Yaczyuk, V.Ya., & Siplivaya, L.E. (2011). E`lementny`j sostav nekotory`x rastenij semeystva Asteraceae // *Nauchny`e vedomosti. Seriya Medicina. Farmaciya*, 22, 164-166. (in Russ.).

4. Gaponov, S.P., Slivkin, A.I., & D`yakova, N.A. (2016). Izuchenie osobennostej nakopleniya radionuklidov travoj poly`ni gor`koj. In *Puti i formy` sovershenstvovaniya farmacevticheskogo obrazovaniya. Sozdanie novy`x fiziologicheskii aktivny`x veshhestv: Materialy` 6-j Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii «Farmobrazovanie-2016»* (pp. 232-236). Voronezh: Izdatel`sko-poligraficheskij centr Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. (in Russ.).

5. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossijskoj Federacii* (Iss. XV). <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15> (in Russ.).

6. D`yakova, N.A. (2022). Izuchenie nakopleniya radionuklidov lekarstvenny`m rastitel`ny`m sy`r`em Central`nogo Chernozem`ya. *Vestnik Smolenskoj Gosudarstvennoj Medicinskoj Akademii*, 21(3), 171-176. (in Russ.).

7. D`yakova, N.A. (2022). *Metodicheskie rekomendacii po zagotovke lekarstvennogo rastitel`nogo sy`r`ya v Voronezhskoj oblasti*. Voronezh: Izdatel`skij Dom VGU. (in Russ.).

8. D`yakova, N.A. (2020). Nakoplenie tyazhely`x metallov i my`sh`yaka travoj poly`ni gor`koj. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Ximiya. Biologiya. E`kologiya*, 20(4), 445-453. (in Russ.).

9. D`yakova, N.A. (2022). *E`kologicheskaya ocenka sy`r`evy`x resursov lekarstvenny`x rastenij Voronezhskoj oblasti*. Voronezh: Cifrovaya poligrafiya. (in Russ.).

10. D`yakova, N.A. (2023). *E`kologo-farmakognosticheskaya ocenka radionuklidnogo zagryazneniya lekarstvennogo rastitel`nogo sy`r`ya Voronezhskoj oblasti*. Moskva: Rusajns. (in Russ.).

11. D`yakova, N.A., Slivkin, A.I., & Gaponov, S.P. (2019). Ocenka radionuklidnogo zagryazneniya lekarstvennogo rastitel`nogo sy`r`ya v Central`nom Chernozem`e na primere travy` poly`ni gor`koj. *Voprosy` obespecheniya kachestva lekarstvenny`x sredstv*, 3(25), 36-44. (in Russ.).

12. D'yakova, N.A., & Ukolova, I.R. (2019). Soderzhanie radionuklidov v trave poly'ni gor'koj, sobrannoj v Central'nom Chernozem'e. In *Materialy` 65-j Vserossijskoj mezhvuzovskoj studencheskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem «Molodezh`, nauka, medicina»* (pp. 324-327). Tver': Redakcionno-izdatel'skij centr Tverskogo sudarstvennogo medicinskogo universiteta. (in Russ.).
13. Kolchanov, R.A., & Kolchanov, A.F. (2009). Soderzhanie ceziya-137 v lekarstvenny'x rasteniyax na territorii Belgorodskoj oblasti. *Nauchny'e vedomosti BelGU*, 11(66), 14-17. (in Russ.).
14. Korolyov, A.S., Gladyshev, A.A., & Yutkina, I.S. (2014). Osobennosti nakopleniya bioelementov v nadzemnoj chasti *Artemisia absinthium* L. na shlamovom pole kriolitovogo zavoda. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 5(49), 159-161. (in Russ.).
15. Kurkin, V.A. (2004). *Farmakognoziya*. Samara: Ofort, 1174 s. (in Russ.).
16. Kurolap, S.A., Mamchik, N.P., & Klepikov, O.V. i dr. (2010). *Mediko-e'kologicheskij atlas Voronezhskoj oblasti*. Voronezh: Voronezhskaya oblastnaya tipografiya. (in Russ.).
17. K`osev, P.A. (2011). *Lekarstvenny'e rasteniya: samy`j polny`j spravochnik*. Moskva: E'ksmo-Press. (in Russ.).
18. Lyubimov, V.B., Anishhenko, L.N., Borzdy`ko, E.V., Markelova, N.V., Pospelaj, Yu.G., Skovorodnikova, N.A., Azarchenkova, E.A., & Mokroguzova, V.N. (2011). Itogi razrabotki sistemy` bioanaliza na regional'noj osnove v monitoringe sred obitaniya. *Ezhegodnik NII fundamental'ny'x i prikladny'x issledovanij*, 1(2), 49-60. (in Russ.).
19. Milyutina, N.O., Osmolovskaya, N.G., Politaeva, N.A., & Kurilenko, V.V. (2020). Analiz migracii tyazhely'x metallov v sisteme «pochva–rastenie» pri e'kologo-geologicheskoy ocenke okruzhayushhej sredy` vokrug poligona TKO v g. Tambov. *Geoe'kologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 3, 55-63. (in Russ.).
20. Poznyak, S.S. (2011). Soderzhanie nekotory'x tyazhely'x metallov v rastitel`nosti polevy'x i lugovy'x agrofитocenozov v usloviyax texnogennoho zagryazneniya pochvennogo pokrova. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 1, 13-19. (in Russ.).
21. Popp, Ya.I., & Bokova, T.I. (2017). Soderzhanie cinka, medi i kadmiya v razlichny'x vidax lekarstvenny'x rastenij, proizrastayushhix v pojmax rek Irtysha i Obi. *Vestnik NGAU*, 1(42), 84-92. (in Russ.).
22. Tereshkina, O.I., Rudakova, I.P., & Samy`lina, I.A. (2011). Ocenka riska radionuklidnogo zagryazneniya lekarstvennogo rastitel'nogo sy'r'ya. *Farmaciya*, 7, 3-6. (in Russ.).
23. Czvelev, N.N. (2000). *Opredelitel` sosudisty'x rastenij Severo – Zapadnoj Rossii*. SPb.: Izd-vo SPUVA. (in Russ.).
24. Chibrik, T.S. (2014). Izmenchivost` mikroelementnogo sostava *Artemisia absinthium* L. *E'kosistemy`, ix optimizaciya i oxrana*, 11, 106-113. (in Russ.).

дата поступления: 29.01.2024

дата принятия: 20.03.2024

© Дьякова Н.А., 2024

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

ОТВЕТНАЯ АНТИОКСИДАНТНАЯ РЕАКЦИЯ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

A.S. Petukhov, T.A. Kremleva, G.A. Petukhova, N.A. Khritokhin

ANTIOXIDATIVE RESPONSE OF HERBS OF VARIOUS SPECIES TO HEAVY METAL ENVIRONMENTAL POLLUTION

Аннотация. Целью работы стало изучение антиоксидантных систем (содержание фенолов, флавоноидов и активности каталазы) в травянистых растениях различных видов в условиях загрязнения г. Тюмени тяжелыми металлами. Материал для исследования (почвы и травянистые растения: мать-и-мачеха, клевер красный, мятлик луговой, мышиный горошек) отбирали на условно-чистом участке, в районе автотрассы, моторостроительного, нефтеперерабатывающего, аккумуляторного и металлургического завода. Изменение активности антиоксидантных систем в травянистых растениях в условиях загрязнения городской среды тяжелыми металлами оказалось видоспецифичным. В клевере красном и мать-и-мачехе наблюдалось снижение содержания фенолов, флавоноидов и активности каталазы. Для мятлика лугового была отмечена тенденция к уменьшению содержания флавоноидов, но росту содержания фенолов. Наиболее чувствительным видом по антиоксидантному статусу оказался мышиный горошек, а наименее – клевер красный. Изменение активности каталазы оказалось наиболее чувствительным к условиям загрязнения городской среды. Содержание тяжелых металлов в клевере красном и мать-и-мачехе отрицательно коррелировало с уровнем фенолов и флавоноидов, а для мятлика лугового и мышиного горошка отмечены положительные корреляции. Изменение антиоксидантного статуса растений можно рекомендовать как часть комплексного мониторинга загрязнения окружающей среды металлами.

Ключевые слова: тяжелые металлы; растения; фенолы; флавоноиды; каталаза; антиоксиданты.

Сведения об авторах: Петухов Александр Сергеевич, Тюменский государственный университет, revo251@mail.ru; Кремлева Татьяна Анатольевна, д-р хим. наук, Тюменский государственный университет, t.a.kremleva@utmn.ru; Петухова Галина Александровна, д-р биол. наук, Тюменский государственный университет, gpetuhova1@mail.ru; Хритохин Николай Александрович, канд. хим. наук, Тюменский государственный университет, kna@utmn.ru

Abstract. The purpose of this study is the investigation of antioxidant systems (phenolics, flavonoids, and catalase activity) in herbs of various species in conditions of heavy metal pollution of Tyumen. Soil and plant samples (coltsfoot, red clover, meadow grass, and wild vetch) were collected at the control site, highway, engine-building, oil refinery, battery manufacturing, and metallurgical plants. The antioxidant response of herbs to heavy metal accumulation turned out to be species-specific. In red clover and coltsfoot catalase activity, as well as content of phenolics and flavonoids decreased. In meadow grass flavonoids decreased, but phenolics concentration increased. The most resistant and sensitive plant species by antioxidant status was wild vetch. Catalase activity was the most sensitive to metal pollution. The concentration of heavy metals in red clover and coltsfoot negatively correlated with phenols and flavonoids, while in meadow grass and wild vetch positively correlated. Antioxidant status of plants can be recommended as part of the complex monitoring of environmental metal pollution.

Keywords: heavy metals; plants; phenolics; flavonoids; catalase; antioxidants.

About the authors: Alexander S. Petukhov, Tyumen State University, Tyumen, Russia, revo251@mail.ru; Tatyana A. Kremleva, Doctor of Chemical Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia, t.a.kremleva@utmn.ru; Galina A. Petukhova, Doctor of Biological Sciences, Tyumen, Russia, gpetuhova1@mail.ru; Nikolay A. Khritokhin, Candidate of Chemical Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia, kna@utmn.ru

Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А. Ответная антиоксидантная реакция травянистых растений различных видов на загрязнение среды тяжелыми металлами // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 25-36. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/03>

Petukhov, A.S., Kremleva, T.A., Petukhova, G.A., & Khritokhin, N.A. (2024). Antioxidative Response of Herbs of Various Species to Heavy Metal Environmental Pollution. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 25-36. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/03>

Введение. Антропогенное загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) является одной из наиболее распространенных и опасных экологических проблем. Накопление ТМ в почвах приводит к снижению плодородия, подавлению роста и развития растений [14]. ТМ нарушают минеральное питание растений, водный обмен, процессы дыхания [28]. Поглощение растениями ТМ сопровождается и рядом биохимических изменений.

В силу своей способности связываться с функциональными группами биомолекул, менять степень окисления и замещать ионы других металлов, ТМ способны вызывать в клетках растений окислительный стресс [13; 30]. Смещение окислительно-восстановительного равновесия сказывается на активности антиоксидантных систем неферментной природы (фенолы, флавоноиды и другие), а также ферментной природы (каталаза, пероксидаза, супероксиддисмутаза) [17]. С одной стороны, ТМ могут повреждать структуру и биосинтез антиоксидантов, с другой, стресс, создаваемый накоплением металлов, вынуждает растения активировать антиоксиданты для обрыва цепей свободнорадикального окисления, связывания активных форм кислорода и блокирования окислительных процессов [2; 17; 21].

Изучение активности антиоксидантных систем растений в условиях накопления металлов может являться частью биомониторинга антропогенно нарушенных территорий с целью установления степени токсичности загрязнения. Взаимосвязь между содержанием металлов и антиоксидантным статусом растений позволяет исследовать механизмы воздействия ТМ, а также выявлять наиболее чувствительные антиоксиданты. Целью работы стало изучение антиоксидантных систем (содержание фенолов, флавоноидов и активности каталазы) в травянистых растениях различных видов в условиях загрязнения г. Тюмени тяжелыми металлами.

Материал и методы исследования. Материал для исследования отобран в конце июля 2018 г. в г. Тюмени. Пробы почв и растений отбирали в условно-чистом районе за городом, вблизи автотрассы (30 метров от дороги) на удалении 30 км от г. Тюмени, и на расстоянии 200 метров от следующих предприятий: «Тюменский аккумуляторный завод» (Аккумуляторный завод), «Антипинский нефтеперерабатывающий завод» (НПЗ), «Тюменские моторостроители» (Моторный завод), и «УГМК-Сталь». Все изученные почвы относились к дерново-подзолистому подтипу, характерному для района исследования.

Отбирали надземную часть травянистых растений: мышиный горошек (*Vicia cracca* L.), клевер красный (*Trifolium rubens* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.). Данные виды растений были выбраны благодаря их широкому распространению в районе исследования. Усредненная проба состояла из 100 растений каждого вида, отобранных с пяти точек на каждом участке. Поверхностный слой почвы (0–10 см) отбирали методом конверта, усредняли, перетирали и просеивали.

Анализ содержания ТМ проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе «ContrAA 700» (Analytic Jena, Германия). В почвах определяли подвижные формы металлов с помощью ацетатно-аммонийного буфера pH=4,8 [10], а также кислоторастворимую форму при помощи 5 М HNO₃ [12]. Содержание металлов в растениях определяли экстракцией 5 М HNO₃ из золы растений.

Содержание флавоноидов определяли при помощи фотометрической реакции AlCl₃ со спиртовыми экстрактами растений, измерения проводили на $\lambda=410$ нм [3]. Растительные фенолы определяли в водном экстракте растений титрованием KMnO₄ с фиолетового до золотисто-желтого окрашивания по индигокармину [9]. Активность каталазы исследовали проведением фотометрической реакции молибдата аммония с перекисью водорода в водных экстрактах растений, измерения проводили на $\lambda=470$ нм [5].

Все измерения проводили в трех параллелях. Результаты анализов были подвергнуты стандартной статистической обработке в программе Statistica 10. Рассчитывали среднее значение, стандартную ошибку, доверительный интервал, сравнение выборок проводили по t-критерию Стьюдента при уровне доверительной вероятности $P \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. Содержание ТМ в почвах и растениях г. Тюмени было описано ранее в нашей предыдущей работе [26]. Содержание Cu, Zn, Fe и Mn в почвах г. Тюмени превышало контроль на всех изученных участках. Максимальное содержание всех ТМ в почве было зарегистрировано в районе металлургического и аккумуляторного завода. Содержание Cu в растениях было в диапазоне 3–13 мг/кг. Способность к накоплению Cu растениями относительно контроля убывала в ряду: мышиный горошек>мать-и-мачеха>клевер красный>мятлик луговой. Содержание Zn в растениях изменялось от 13 до 61 мг/кг. Аккумуляция Zn травами убывала в ряду: мать-и-мачеха>мышиный горошек>мятлик луговой>клевер красный. Во всех изученных видах растений в условиях городской среды наблюдалась аккумуляция Fe по сравнению с контролем. Наиболее значима аккумуляция Fe была зарегистрирована в районе аккумуляторного и металлургического завода, с максимальным превышением контроля до 17 раз для мать-и-мачехи вблизи металлургического завода. Вероятно, это обусловлено работой сталеплавильных цехов. Содержание Mn в растениях изменялось в пределе от 17 до 152 мг/кг. Аккумуляция Mn относительно контроля была характерна для всех видов растений, но только в районе автотрассы и металлургического завода. Это может быть обусловлено применением Mn в качестве легирующих добавок и антидетонационных присадок в бензине.

Ответная реакция антиоксидантных систем растений на загрязнение городской среды тяжелыми металлами оказалось видоспецифичной.

Содержание фенолов и флавоноидов в клевере красном было снижено, на 10–40% (рис. 1, 2). Аналогичная картина наблюдалась для мать-и-мачехи, содержание фенолов и флавоноидов было ниже контроля до 50–60%. Возможно, снижение концентрации фенолов и флавоноидов связано с хелатированием ионов металлов гидроксильными, карбонильными и карбоксильными группами этих соединений [20; 24; 25]. Кроме того, возможно нарушение биосинтеза фенолов тяжелыми металлами. Были зарегистрированы отрицательные корреляции между содержанием Cu и уровнем флавоноидов в клевере красном ($R=-0,93$) и мать-и-мачехе ($R=-0,87$). Содержание подвижной формы Cu в почве отрицательно коррелировало с уровнем флавоноидов в клевере красном ($R=-0,67$), а содержание Mn было в обратной взаимосвязи с концентрацией фенолов ($R=-0,78$). Содержание Cu, Zn и Mn в мать-и-мачехи отрицательно коррелировало с уровнем флавоноидов ($R=-0,87$; $-0,89$; $-0,80$ соответственно), в то время как содержание Mn, Fe и Zn отрицательно коррелировало с концентрацией фенолов ($R=-0,79$; $-0,70$; $-0,66$).

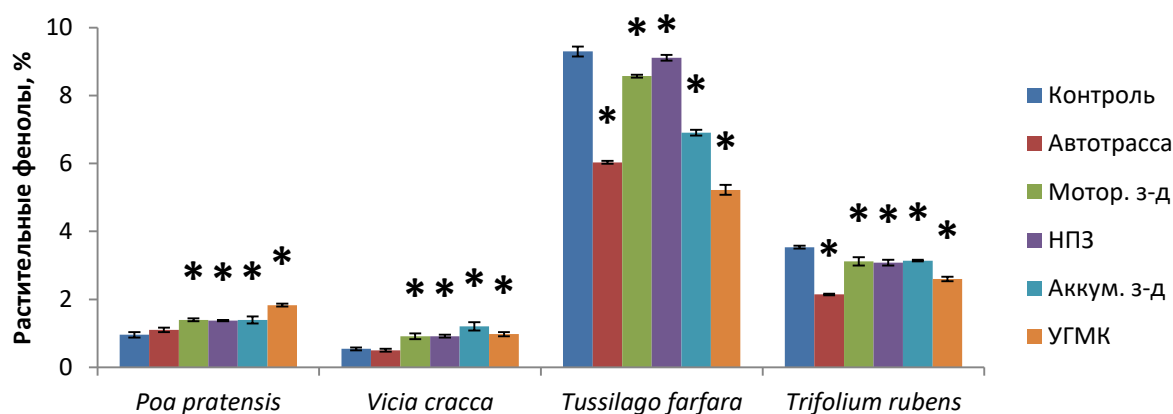


Рис. 1. Содержание фенольных антиоксидантов в травянистых растениях г. Тюмени

Примечание: планки погрешности указывают доверительный интервал при $P \leq 0,05$

*- статистически достоверные различия между контролем и вариантом опыта (при $P \leq 0,05$)

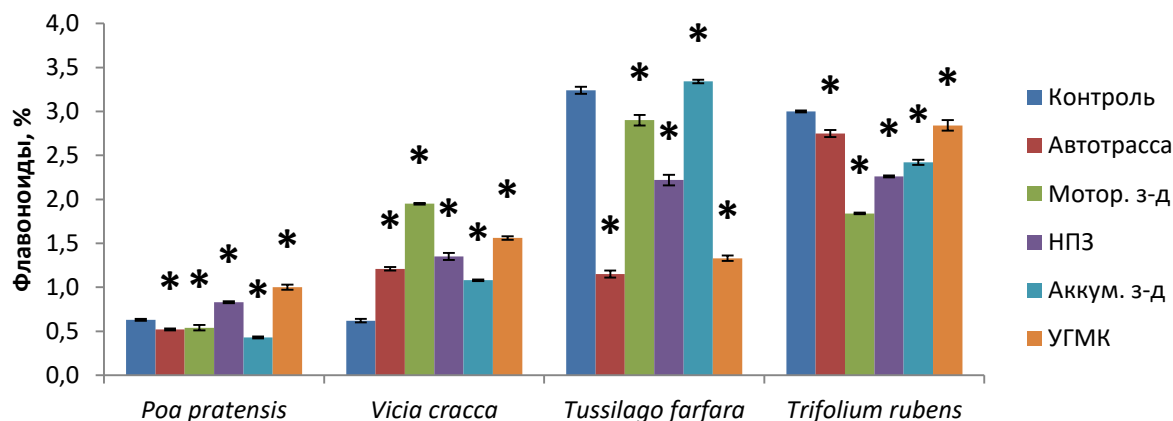


Рис. 2. Содержание флавоноидов в травянистых растениях г. Тюмени

В условиях стресса от ТМ в клетках растений могут развиваться радикальные процессы окисления, фенольные соединения обладают антиоксидантной функцией и могут расходоваться на связывание свободных радикалов. При этом фенолы превращаются в феноксильные радикалы, обладающие окислительной способностью [22]. Поэтому синтез флавоноидов при накоплении феноксильных радикалов может быть ингибирован в условиях высокого антропогенного загрязнения. Фенолы и флавоноиды сами могут быть окислены активными формами кислорода, что также приводит к снижению их содержания.

Снижение содержания флавоноидов в условиях городской среды было обнаружено в горце птичьим [1]. Содержание фенольных антиоксидантов в травянистых растениях г. Калининграда было также снижено по сравнению с фоном [23]. Листья мать-и-мачехи обладают лекарственными свойствами [29], однако понижение уровня антиоксидантов в условиях загрязнения окружающей среды может снижать ценность и эффективность такого сырья.

В клетках мышиного горошка наблюдалась противоположная картина: содержание фенолов и флавоноидов было повышено практически на всех участках по сравнению с контролем в 1,7–3,1 раза (рис. 1, 2). В клетках мятлика лугового содержание фенолов было также повышено, по сравнению с контролем, на большинстве участков, как минимум, на 40% (рис. 1). Однако изменение содержания флавоноидов в клетках мятлика лугового было неоднозначным: концентрация флавоноидов была ниже контроля вблизи автотрассы, моторостроительного и аккумуляторного завода, но повышена в районе аккумуляторного и металлургического заводов, характеризующихся более высоким содержанием ТМ в почвах (рис. 2). В отличие от мать-и-мачехи и клевера красного, для мышиного горошка и мятлика лугового наблюдались положительные корреляции между содержанием ТМ и уровнем фенольных антиоксидантов. Так, для мышиного горошка содержание Cu положительно коррелировало с уровнем флавоноидов ($R=0,88$), а Zn – с фенолами ($R=0,60$). Кроме того, содержание подвижной формы Mn в почве также положительно коррелировало с концентрацией флавоноидов ($R=0,70$), а уровень фенолов в клетках был положительно связан с концентрацией кислоторастворимой формы Cu и Zn в почвах ($R=0,94$; $0,83$). Содержание Zn в мятлике луговом положительно коррелировало с уровнем флавоноидов ($R=0,91$), Fe и Zn также коррелировали с фенолами ($R=0,89$, $0,78$ соответственно).

Увеличение содержания флавоноидов может быть обусловлено необходимостью растений повышать свой антиоксидантный статус в условиях накопления в клетках свободных радикалов и активных форм кислорода. Флавоноиды способны связывать супероксидный анион-радикал [24], а также подавляют активность ферментов, генерирующих активные формы кислорода [30]. Флавоноиды способны подавлять окисление клеточных мембран путем сорбции [25]. Процессы фотосинтеза, дыхания и роста растений подавляются при накоплении ТМ, флавоноиды принимают участие в этих процессах, поэтому их дополнительный синтез может компенсировать токсический эффект

металлов. В предыдущих исследованиях выявлено увеличение содержания флавоноидов в горце птичьим в районе газоперерабатывающего завода [8].

Изменение активности каталазы в клетках растений оказалось видоспецифичным. В литературе сообщалось о видоспецифичном изменении активности каталазы в клетках растений при поливе растворами ТМ [31] и выращивании в почве, загрязненной Ni, Pb, Cu и Zn [18]. В клетках мятлика лугового активность каталазы была снижена в районе НПЗ и УГМК до 70%. В клетках клевера красного активность каталазы была снижена по сравнению с контролем практически во всех районах исследования (рис. 3), при этом активность каталазы отрицательно коррелировала с содержанием кислоторастворимой формы Fe в почве ($R=-0,61$).

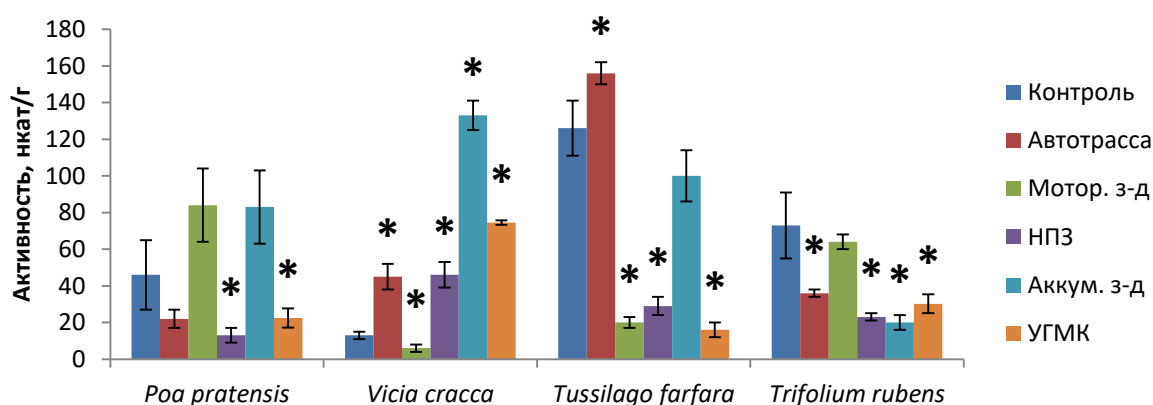


Рис. 3. Активность каталазы в травянистых растениях г. Тюмени

Снижение активности каталазы может быть обусловлено повреждением структуры фермента и нарушением путей ее биосинтеза. ТМ могут связываться с тиольными, amino и карбоксильными группами аминокислот каталазы или ферментов ее биосинтеза, что приведет к снижению активности каталазы. Накопление металлов в клетках провоцирует окислительный стресс, образующиеся активные формы кислорода могут также повредить структуру каталазы путем окисления углеводородного скелета аминокислот. В других исследованиях описано отрицательное влияние Cd на активность каталазы в проростках пшеницы [4] и кресс-салата [7]. О снижении активности каталазы в клевере в условиях городской среды сообщалось в литературе [11]. Металлы, обладающие близким ионным радиусом к иону Fe^{2+} , могут замещать железо в составе гема, что также снизит активность каталазы.

Изменение активности каталазы в клетках мать-и-мачехи оказалось неоднозначным. Активность фермента была снижена практически на всех участках, за исключением автотрассы. Район автотрассы можно рассматривать как участок с относительно невысокой антропогенной нагрузкой (т. к. отсутствуют промышленные предприятия в непосредственной близости). В условиях низкой антропогенной нагрузки активность каталазы была увеличена, вероятно, из-за повышенной необходимости утилизировать

перекись водорода, однако при увеличении уровня стресса, активность фермента снизилась по вышеописанным причинам.

Изменение активности каталазы в мышином горошке оказалось также неоднозначным (рис. 3). В клетках мышиного горошка активность каталазы была повышена на всех участках, за исключением моторостроительного завода, при этом выявлены положительные корреляции между содержанием кислоторастворимой формы Cu , Zn и Fe и активностью каталазы ($R=0,74$; $0,84$; $0,86$ соответственно).

Активность каталазы в клетках растений может быть повышена в связи с накоплением в клетках перекиси водорода, окисляющей липидный слой мембран. В литературе сообщалось, что обработка растений сточными водами с высоким содержанием ТМ [6] или раствором хлорида кадмия [15] приводит к увеличению активности каталазы в клетках. Увеличение активности каталазы в условиях городской среды наблюдалось ранее в травянистых растениях [27], а также в древесных растениях [19].

Заключение. Таким образом, изменение активности антиоксидантных систем в травянистых растениях в условиях загрязнения городской среды тяжелыми металлами оказалось видоспецифичным. В клетках мать-и-мачехи и клевера красного наблюдалось снижение содержания фенолов, флавоноидов и активности каталазы. Для мятлика лугового была отмечена тенденция к уменьшению содержания флавоноидов, но росту содержания фенолов. Снижение антиоксидантного статуса растений свидетельствует об угнетении жизнедеятельности растений в городской среде и о возможном сокращении численности и видового разнообразия растений, а также о снижении ценности использования растений для лекарственных целей. Наиболее чувствительным видом по антиоксидантному статусу оказался мышиный горошек, а наименее – клевер красный. Изменение активности каталазы оказалось наиболее чувствительным к условиям загрязнения городской среды. Содержание тяжелых металлов в клевере красном и мать-и-мачехе отрицательно коррелировало с уровнем фенолов и флавоноидов, а для мятлика лугового и мышиного горошка отмечены положительные корреляции. Изменение антиоксидантного статуса можно рекомендовать как часть комплексного мониторинга загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Тюменской области №20-45-720011

Литература

1. 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.

2. Гарифзянов А.Р., Жуков Н.Н., Иванищев В.В. Образование и физиологические реакции активных форм кислорода в клетках растений // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 2. С. 2-2.
3. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. С. 41-43.
4. Колесниченко В.В., Колесниченко А.В. Изучение влияния высокой концентрации кадмия на функционирование антиоксидантных систем этиолированных проростков пшеницы разной длины // Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 2011. № 3. Pp. 212-221.
5. Королук М.А., Иванова Л.И., Майорова Н.О., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. 1988. № 1. С. 16.
6. Мурзаева С.В. Накопление тяжелых металлов и активность антиоксидантных ферментов в пшенице при воздействии сточных вод // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2002. Т.4. № 2. С. 260-269.
7. Науменко О.А., Саблина Е.В., Кабышева М.И., Костенецкая Е.А. Исследование механизма повреждающего действия избыточных концентраций кадмия на состояние антиоксидантных ферментов кресс-салата // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. Т. 159, №10. С. 205-207.
8. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф., Петрова Г.В., Шайхутдинова А.А. Некоторые аспекты адаптации *Polygonum aviculare* L. к загрязнению почвы тяжелыми металлами // Известия ОГАУ. 2012. № 1(1).
9. Общая фармакопейная статья 1.5.3.0008.15. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. М., 2015. 4 с.
10. ПНД Ф 16.1:2.2.2:2.3.78-2013 Методика измерения массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии. М., 2013.
11. Половникова М.Г., Воскресенская О.Л. Активность компонентов антиоксидантной защиты и полифенолоксидазы у газонных растений в онтогенезе в условиях городской среды // Физиология растений. 2008. № 55(5). С. 777-785.
12. Руководящий документ РД 52.18.191-2018. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Обнинск, 2019.
13. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И. Химические основы токсического действия тяжелых металлов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 1. С. 1-10.
14. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.

15. Anjum S.A., Tanveer M., Hussain S., Bao M., Wang L., Khan I. Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. №21. Pp. 17022-17030.
16. Arif N., Yadav V., Singh S., Kushwaha B.K., Singh S., Trupathi D.K. et al. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // *Plant Response to Xenobiotics*. 2016. Pp. 97-125.
17. Ghorri N.H., Ghorri T., Hayat M.Q., Imadi S.R., Gul A., Altay V., Ozturk M. Heavy metal stress and responses in plants // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. № 16. Pp. 1807-1828.
18. Kachout S.S., Ben Mansoura A., Leclerc J.C., Mechergui R., Rejeb M.N., Ouerghi Z. Effects of heavy metals on antioxidant activities of *Artiplex hortensis* and *A. rosea* // *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2009. № 7. Pp. 938-945.
19. Khosropour E., Attarod P., Shirvany A. et al. Response of *Platanus orientalis* leaves to urban pollution by heavy metals // *Journal of forestry research*. 2019. T. 30. C. 1437-1445.
20. Lachman J., Dudjak J., Miholova D., Kolihoiva D. Effect of cadmium on flavonoid content in young barley (*Hordeum sativum* L.) plants // *Plant, Soil and Environment*. 2005. № 11. Pp. 513-516.
21. Maleki M., Ghorbanpour M., Kariman K. Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metal stress // *Plant Gene*. 2017. № 7. Pp. 247-254.
22. Marquez-Garcia B., Angeles-Fernandez-Recamales M., Cordoba F. Effects of cadmium on phenolic composition and antioxidant activities of *Erica andevalensis* // *Journal of Botany*. 2012. № 91. Pp. 91-98.
23. Maslennikov P.V., Chupakhina G.N., Skrypnik L.N., Feduraev P.V., Melnik A.S. Assessment of the antioxidant potential of plants in urban ecosystems under conditions of anthropogenic pollution of soils // *Russian Journal of Ecology*. 2018. № 49(5). Pp. 384-394.
24. Michalak A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress // *Polish journal of environmental studies*. 2006. № 15. Pp. 523-530.
25. Mierziak J., Kostyn K., Kulma A. Flavonoids as important molecules of plant interaction with the environment // *Molecules*. 2014. № 19. Pp. 16240-16265.
26. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Khritokhin N.A. Translocation of Heavy Metals in Herbs under Urban Anthropogenic Pollution Conditions // *Environmental Processes*. 2020. № 7. Pp. 1173-1196.
27. 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. №9(1). P. 47-55.
28. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environment International*. 2019. № 125. Pp. 365-385.
29. Shikov A.N., Pozharitskaya O.N., Makarov V.G., Wagner H., Verpoorte R., Heinrich M.. Medicinal plants of the Russian pharmacopeia; their history and applications // *Journal of Ethnopharmacology*. 2014. № 154. Pp. 481-536.

30. Skorzynska-Polit E. Lipid peroxidation on plant cells, its physiological role and changes under heavy metal stress // *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2007. №74. Pp. 49-54.

31. Zhang F.Q., Wang Y.S., Lou Z.P., Dong J.D. Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*) // *Chemosphere*. 2007. № 67. Pp. 44-50.

References

1. Velikanova, N.A., Slivkin, A.I., & Gaponov, S.P. (2013). Izuchenie nakoplenija flavonoidov travoj gorca ptich'ego, sobrannogo v raznyh s jekologicheskoj točki zrenija rajonah goroda Voronezha i ego okrestnostej. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Himija. Biologija. Farmacija*, 1, 181-185. (in Russ.).

2. Garifzjanov, A.R., Zhukov, N.N., & Ivanishhev, V.V. (2011). Formation and physiological reactions of oxygen active forms in plants cells. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2, 2-2 (in Russ.).

3. Ermakov, A.I., Arasimovich, V.V., Yarosh, N.P., Peruansky, Yu.V., Lukovnikova, G.A., & Ikonnikova, M.I. (1987). *Metody biohimicheskogo issledovanija rastenij*. Leningrad. (in Russ.).

4. Kolesnichenko, V.V., & Kolesnichenko, A.V. (2011). The influence of high Cd^{2+} concentration on antioxidant system of wheat etiolated shoots with different length. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 3, 212-221. (in Russ.).

5. Koroljuk, M.A., Ivanova, L.I., Majorova, N.O., & Tokarev, V.E. Metod opredelenija aktivnosti katalazy. *Laboratornoe delo*, 1, 16. (in Russ.).

6. Murzaeva, S.V. (2002). The accumulation of heavy metals and the activity of antioxidative enzymes in wheat exercise influence of sewages. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 4(2), 260-269. (in Russ.).

7. Naumenko, O.A., Sablina, E.V., Kabysheva, M.I., & Kosteneckaja, E.A. (2013). Issledovanie mehanizma povrezhdajushhego dejstvija izbytochnyh koncentracij kadmija na sostojanie antioksidantnyh fermentov kress-salata. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 159(10), 205-207. (in Russ.).

8. Nemereshina, O.N., Gusev, N.F., Petrova, G.V., & Shajhutdinova, A.A. (2012). Nekotorye aspekty adaptacii *Polygonum aviculare* L. k zagrizneniju pochvy tjazhelymi metallami. *Izvestija OGAU*, 1(1). (in Russ.).

9. Obshhaja farmakopejnaja stat'ja 1.5.3.0008.15. *Opredelenie sodержanija dubil'nyh veshhestv v lekarstvennom rastitel'nom syr'e i lekarstvennyh rastitel'nyh preparatah*. (in Russ.).

10. PND F 16.1:2:2.2:2.3.78-2013. *Metodika izmerenija massovoj doli podvizhnyh form metallov: medi, cinka, svinca, kadmija, marganca, nikelja, kobal'ta, hroma v probah pochv, gruntov, donnyh otlozhenij, osadkov stochnyh vod metodom plamennoj atomno-absorbcionnoj spektrometrii*. (in Russ.).

11. Polovnikova, M.G., & Voskresenskaja, O.L. (2008). Aktivnost' komponentov antioksidantnoj zashhity i polifenoloksidazy u gazonnyh rastenij v ontogeneze v uslovijah gorodskoj sredy. *Fiziologija rastenij*, 55(5), 777-785. (in Russ.).

12. Rukovodjashhij dokument RD 52.18.191-2018. *Massovaja dolja kislotorastvorimyh form metallov v probah pochv, gruntov i donnyh otlozhenij*. (in Russ.).
13. Skugoreva, S.G., Ashihmina, T.Ja., Fokina, A.I., & Ljalina, E.I. (2016). Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review). *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*, 1, 1-10. (in Russ.).
14. Titov, A.F., Kaznina, N.M., & Talanova, V.V. (2014). *Tjzhelye metally i rastenija*. Petrozavodsk. (in Russ.).
15. Anjum, S.A., Tanveer, M., Hussain, S., Bao, M., Wang, L., & Khan, I. (2015). Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 17022-17030.
16. Arif, N., Yadav, V., Singh, S., Kushwaha, B.K., Singh, S., & Trupathi, D.K. et al. (2016). Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals. *Plant Response to Xenobiotics*, 97-125.
17. Ghor, N.H., Ghor, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V., & Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1807-1828.
18. Kachout, S.S., Ben Mansoura, A., Leclerc, J.C., Mechergui, R., Rejeb, M.N., & Ouerghi, Z. (2009). Effects of heavy metals on antioxidant activities of *Artiplex hortensis* and *A. rosea*. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7, 938-945.
19. Khosropour, E., Attarod, P., & Shirvany, A. et al. (2018). Response of *Platanus orientalis* leaves to urban pollution by heavy metals. *J. For. Res.*, 30.
20. Lachman, J., Dudjak, J., Miholova, D., & Kolihova, D. (2005). Effect of cadmium on flavonoid content in young barley (*Hordeum sativum* L.) plants. *Plant, Soil and Environment*, 11, 513-516.
21. Maleki, M., Ghorbanpour, M., & Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metal stress. *Plant Gene*, 7, 247-254.
22. Marquez-Garcia, B., Angeles-Fernandez-Recamales, M., & Cordoba, F. (2012). Effects of cadmium on phenolic composition and antioxidant activities of *Erica andevalensis*. *Journal of Botany*, 91, 91-98.
23. Maslennikov, P.V., Chupakhina, G.N., Skrypnik, L.N., Feduraev, P.V., & Melnik, A.S. (2018). Assessment of the antioxidant potential of plants in urban ecosystems under conditions of anthropogenic pollution of soils. *Russian Journal of Ecology*, 49, 384-394.
24. Michalak, A. (2006). Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15, 523-530.
25. Mierziak, J., Kostyn, K., & Kulma, A. (2014). Flavonoids as important molecules of plant interaction with the environment. *Molecules*, 19, 16240-16265. (in Russ.).
26. Petukhov, A.S., Kremleva, T.A., Petukhova, G.A., & Khritokhin, N.A. (2020). Translocation of Heavy Metals in Herbs under Urban Anthropogenic Pollution Conditions. *Environmental Processes*, 7, 1173-1196.

27. Rai, P.K. (2015). 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*, 9, 47-55.
28. Rai, P.K., Lee, S.S., Zhang, M., Tsang, Y.F., & Kim, K. (2019). Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*, 125, 365-385.
29. Shikov, A.N., Pozharitskaya, O.N., Makarov, V.G., Wagner, H., Verpoorte, & R., Heinrich, M. (2014). Medicinal plants of the Russian pharmacopeia; their history and applications. *Journal of Ethnopharmacology*, 154, 481-536
30. Skorzyńska-Polit, E. (2007). Lipid peroxidation on plant cells, its physiological role and changes under heavy metal stress. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 74, 49-54.
31. Zhang, F.Q., Wang, Y.S., Lou, Z.P., & Dong, J.D. (2007). Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*). *Chemosphere*, 67, 44-50.

дата поступления: 19.01.2023

дата принятия: 30.11.2023

© Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А., 2024

**РДЕСТ ДЛИННЕЙШИЙ *POTAMOGETON PRAELONGUS* WULFEN 1805
(POTAMOGETONACEAE) – ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ВИД ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ В КРАСНУЮ
КНИГУ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

B.F. Sviridenko, Yu.A. Murashko

**POTAMOGETON PRAELONGUS WULFEN 1805 (POTAMOGETONACEAE) AS A
POTENTIAL SPECIES FOR INCLUSION IN THE OMSK REGION RED BOOK**

Аннотация. Целью настоящей работы является подготовка обоснования для включения *Potamogeton praelongus* в третье издание Красной книги Омской области. В число задач входит анализ распространения вида в регионе, обобщение оригинальных количественных данных о его толерантности к ряду факторов водной среды в условиях Западно-Сибирской равнины, уточнение экобиоморфологических параметров вида. В Омской области на протяжении более 60 лет вид был отмечен только в 5 озерах лесной и лесостепной зон, что указывает на его редкость. При этом количественная информация о состоянии популяции вида получена нами только в 2023 г. в оз. Бугалы Большереченского района. Площадь этой популяции достигает 0,28 км². Вид образует единый монодоминантный фитоценоз с проективным покрытием до 30%. Фитоценоз сформирован на серых и темно-серых тонкодетритных илах в диапазоне глубин 1,2–3,0 м. На основе гидрохимического анализа установлено, что вода в оз. Бугалы имеет pH = 6,9, общую жесткость 2,06 мг-экв/дм³, общую минерализацию – 0,44 г/дм³. На Западно-Сибирской равнине *P. praelongus* был отмечен нами в водах с pH от 6,3 до 7,6, при общей жесткости 0,26–6,40 мг-экв/дм³ и общей минерализации 0,03–1,10 г/дм³. Содержание свинца в экотопах вида было равно 0,10–0,22 мкг/дм³, никеля – 0,76 мкг/дм³, цинка – 2,58–17,61 мкг/дм³, кадмия – 0,01–0,02 мкг/дм³, хрома – 0,43–0,44 мкг/дм³, меди – 0,84–5,97 мкг/дм³, марганца – 7,61–32,55 мкг/дм³. Содержание растворимых форм железа достигало 1585 мкг/дм³, что указывает на ферротолерантность вида. На основе выполненной экобиоморфологической оценки *P. praelongus* можно охарактеризовать как многолетний (вегетативно однолетний), поликарпический, длиннопобеговый, столонный, надводноцветущий, нейтрофильный, типично пресноводный, индифферентный к жесткости воды, ферротолерантный, пелобионтный гидатофит. *Potamogeton praelongus* может быть рекомендован

Abstract. This work is intended to prepare a justification for the inclusion of *Potamogeton praelongus* in the third edition of the Red Book of the Omsk Region. The tasks include the analysis of the species distribution in the region, summarizing the original quantitative data about its tolerance to a number of aquatic factors in the West Siberian Plain, and clarification of its ecobiomorphological parameters. Over more than 60 years in the Omsk Region, the species was only reported in 5 lakes of the forest and forest-steppe zones, indicating that it is rare. We obtained the quantitative information about the condition of the species population only in 2023 in the lake Bugaly of the Bolsherechensky District. The population has an area of up to 0.28 km². The species forms a monodominant community with a projective cover of up to 30%. The community is formed on grey and dark-grey thin-detritus silts in the depth range 1.2–3.0 m. According to hydrochemical tests, the water in lake Bugaly has pH = 6.9, total hardness 2.06 mg-eq/dm³, and total salt content 0.44 g/dm³. In the West Siberian Plain, *P. praelongus* was found in waters with pH between 6.3 to 7.6 with total hardness 0.26–6.40 mg-eq/dm³ and total salt content 0.03–1.10 g/dm³. The content of lead in the ecotopes of the species was 0.10–0.22 µg/dm³, nickel 0.76 µg/dm³, zinc 2.58–17.61 µg/dm³, cadmium 0.01–0.02 µg/dm³, chromium 0.43–0.44 µg/dm³, copper 0.84–5.97 µg/dm³, manganese 7.61–32.55 µg/dm³. The content of the soluble forms of iron was up to 1,585.0 µg/dm³, which suggests that the species is tolerant to iron. Based on the ecobiomorphological study performed, *P. praelongus* can be characterized as a perennial (vegetatively annual), polycarpous, long-shooted, stoloniferous, emergent-flowering, neutrophilic, typically freshwater, water hardness-indifferent, iron-tolerant, silt hydatophyte. *Potamogeton praelongus* might be recommended for inclusion

для включения в очередной выпуск региональной Красной книги со статусом 3(R) – редкий вид.

Ключевые слова: цветковые гидромакрофиты; экологическая толерантность; жизненная форма; охрана растений; Западно-Сибирская равнина.

Сведения об авторах: Свириденко Борис Федорович, ORCID: 0009-0007-1930-9744, д-р биол. наук, Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия, bosviri@mail.ru; Мурашко Юрий Александрович, канд. хим. наук, Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия, murashko.yu@mail.ru.

in the coming issue of the regional Red Book with status 3(R) as a rare species.

Keywords: flowering hydromacrophytes; ecological tolerance; life form; plant protection; West Siberian plain.

About the authors: Boris F. Sviridenko, ORCID: 0009-0007-1930-9744, Doctor of Biological Sciences, Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia, bosviri@mail.ru; Yuri A. Murashko, Candidate of Chemical Sciences, Surgut State University, Surgut, Russia, murashko.yu@mail.ru.

Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А. Рдест длиннейший *Potamogeton praelongus* Wulfen 1805 (Potamogetonaceae) – потенциальный вид для включения в красную книгу Омской области // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 37-48. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/04>

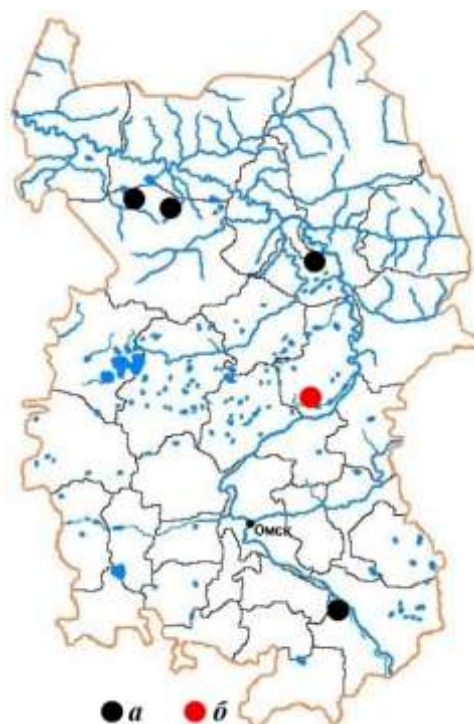
Sviridenko, B.F., & Murashko, Yu.A. (2024). *Potamogeton Praelongus* Wulfen 1805 (Potamogetonaceae) as a Potential Species for Inclusion in the Omsk Region Red Book. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 37-48. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/04>

Введение

Кафедра биологии и биологического образования Омского государственного педагогического университета ежегодно проводит экспедиционные исследования по ведению нового, третьего издания Красной книги Омской области. В 2015 г. во втором издании рдест длиннейший *Potamogeton praelongus* был включен в список растений, нуждающихся в особом внимании к их состоянию в окружающей среде [6; 14]. Целью настоящей работы является подготовка обоснования для включения *Potamogeton praelongus* в третье издание Красной книги Омской области. В число задач входит анализ распространения вида в регионе, обобщение оригинальных количественных данных о его толерантности к ряду факторов водной среды в условиях Западно-Сибирской равнины, уточнение экобиоморфологических параметров вида. В настоящее время в 10 регионах Российской Федерации (Брянская, Владимирская, Ивановская, Калининградская, Калужская, Костромская, Нижегородская, Саратовская, Ярославская области и Республика Татарстан) *P. praelongus* отнесен к числу охраняемых видов [22]. Во всех этих источниках полностью отсутствуют какие-либо количественные сведения по экологии вида, приводятся лишь ограниченные и спорные сведения о биоморфе *P. praelongus*. Вид указан либо как корневищный многолетник, либо о типе подземных побегов ничего не сообщается.

Эволюционное происхождение вида *Potamogeton praelongus* П.И. Дорофеев [4] связывает с ископаемым *Potamogeton praelongatus* Dorofeev, известным в верхнем плиоцене, и с появившимся в миндель-рисское межледниковье плейстоцена ископаемым *Potamogeton praelongus* Wulfen var. *robustus* Dorofeev (то есть возраст вида составляет около 400 тыс. лет). В.П. Никитин [21] указывает более раннее возникновение *P. praelongus*, так как его плоды отмечены в отложениях среднего плиоцена.

По данным «Флоры Сибири» [10], в Омской области редст длиннейший был отмечен в 3 озерах, расположенных в южной и центральной подзонах лесной ботанико-географической зоны на территории Тарского и Тевризского административных районов. Согласно этим материалам вид найден в оз. Молдавское (указано как Молодавское) в 8 км юго-западнее г. Тары, в оз. Секетово (указано как Секстав) в 36 км юго-западнее п. Тевриз и в оз. Тевриз (указано как Теврик) в 28 км южнее п. Тевриз. На юге лесостепной зоны в 2022 г. вид отмечен в оз. Ивановском Нововаршавского района [5]. В 2023 г. новая популяция *Potamogeton praelongus* обнаружена в оз. Бугалы, расположенном в 7 км восточнее д. Березовка на территории Большереченского административного района Омской области (географические координаты: 55°55'39,22" с.ш., 73°59'53,94" в.д.) (рис. 1).



**Рис. 1. Местонахождения *Potamogeton praelongus* в Омской области:
а – известные [9], б – новое**

Материал и методика исследований

Гидрботаническое обследование оз. Бугалы было выполнено 13.08.2023 г. и 21.09.2023 г. на основе общепринятых методик [8; 9]. Латинские названия видов приведены в статье по работе С.К. Черепанова [35]. При проведении исследований большое значение придавалось количественным методам оценки экологических условий существования редких гидрофитов. В том числе системно проводился отбор проб воды в гидроэкотопах (по 1 пробе в ценопопуляции) и выполнялся гидрохимический анализ в лабораториях Центра коллективного пользования Сургутского государственного университета. Цветность воды оценивалась в градусах цветности относительно хром-кобальтовой шкалы (ХКШ) фотометрическим методом с использованием светофильтра с длиной волны 413 нм в кварцевых кюветах [34].

Для измерения водородного показателя использовали анализатор воды «Анион 7000» из комплект-лаборатории «Обь» с электрохимической ячейкой, состоящей из стеклянного и хлорсеребряного электродов. Настройка электродной системы проводилась по стандартному набору буферных растворов, приготовленных из стандарт-титров [11]. Ионный состав растворенных солей в воде определялся методом высокоэффективной жидкостной ионной хроматографии на хроматографе «Стайер» с кондуктометрическим детектором. Для разделения ионов применялись хроматографические колонки: при определении катионов – Shodex IC YS-50, при определении анионов – TRANSGENOMIC IC Ser AN2 [26]. Массовая концентрация карбонат- и гидрокарбонат-ионов определялась по расчетным формулам, учитывающим значения свободной щелочности и общей щелочности [1]. Определение тяжелых металлов в пробах воды выполнено методом атомной абсорбции на спектрометре МГА-915 МД [12].

Результаты и их обсуждение

Озеро Бугалы расположено на границе между центральной и северной подзонами лесостепной ботанико-географической зоны в древней межгрядной ложбине. Приходная часть водного баланса в озере в основном состоит из осадков и поверхностных талых вод, стекающих с водосборной площади в озерную котловину, расположенную у северного основания высокой гривы. Превышение поверхности гривы над водной поверхностью озера составляет 10 м. Максимальная глубина озера достигает 3,0 м, основная часть акватории имеет глубины 1,1–1,7 м. Общая площадь акватории озера равна 1,80 км². По всей прибрежной части озера на глубинах до 1,0–1,3 м сформированы сплавины, занимающие около 1,19 км², тогда как площадь центрального плеса не превышает 0,61 км² (рис. 2). Площадь популяции *Potamogeton praelongus* в оз. Бугалы составляет около 0,28 км². Этот вид формирует единый монодоминантный фитоценоз с проективным покрытием до 30%, в составе которого отмечены с очень низким проективным покрытием другие представители семейства *Potamogetonaceae*: рдест пронзеннолистный *Potamogeton perfoliatus* L. и рдест курчавый *P. crispus* L.

Фитоценоз рдеста длиннейшего занимает самую глубоководную полосу акватории, вытянутую вдоль южной половины центрального плеса с глубинами 1,2–3,0 м. Основными грунтами в этой части акватории являются серые и темно-серые илы. В период наблюдений 13.08.2023 г. рдест длиннейший находился уже в конце фаз вегетации и плодоношения – начале фазы диссеминации (рис. 3).

В оз. Бугалы вдоль северного края центрального плеса в пределах глубин 1,0–1,4 м на бурых грубодетритных и торфянистых илах были отмечены фитоценозы роголистника погруженного *Ceratophyllum demersum* L. (проективное покрытие 100%) и фрагменты фитоценозов кубышки желтой *Nuphar lutea* (L.) Smith, также имеющие проективное покрытие до 100% (рис. 4). Отметим, что кубышка желтая включена в Красную книгу Омской области [13; 14].



Рис. 2. Спутниковое изображение оз. Бугалы. Дата съемки 15.07.2020 г.



Рис. 3. Гербарные образцы *Potamogeton praelongus* из оз. Бугалы. 13.08.2023 г.



Рис. 4. Фрагмент фитоценоза *Nuphar lutea* по краю сплавины в оз. Бугалы. 13.08.2023 г.

Периферическая часть акватории оз. Бугалы с глубинами от уреза воды до 1,0–1,3 м занята сплавиными, сформированными на торфянистых грунтах тростником южным *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. и рогозом широколистным *Typha latifolia* L. с общим проективным покрытием до 70–100%. Ширина полосы сплавинных тростниково-рогозовых группировок составляла от 30–50 м в наиболее узких участках до 400–600 м – в более широких (см. рис. 2). В составе тростниково-рогозовых группировок отмечены также другие сплавинные виды: телиптерис болотный *Thelypteris palustris* Schott и осока ложносытевая *Carex pseudocyperus* L. с проективным покрытием до 5%. Небольшие плесы среди сплавин заняты группировками роголистника погруженного с ряской трехдольной *Lemna trisulca* L. и ряской малой *Lemna minor* L.

На основе выполненного гидрохимического анализа установлено, что вода в оз. Бугалы имеет цветность 82 градуса по хром-кобальтовой шкале, активная реакция воды не превышает 6,9 единиц pH, общая жесткость равна 2,06 мг-экв/дм³, общая минерализация – 0,44 г/дм³. По составу растворенных солей вода относится к хлоридно-гидрокарбонатному классу, группе натрия. Содержание марганца составляло 32,55 мкг/дм³, кадмия – 0,02 мкг/дм³, меди – 5,97 мкг/дм³, свинца – 0,10 мкг/дм³, цинка – 17,61 мкг/дм³, хрома – 0,43 мкг/дм³. В целом в пяти озерах Западно-Сибирской равнины *Potamogeton praelongus* отмечен нами в водах с pH от 6,3 до 7,6, при общей жесткости от 0,26 до 6,40 мг-экв/дм³ и общей минерализации от 0,03 до 1,10 г/дм³. Содержание растворимых форм свинца в воде экотопов составило 0,10–0,22 мкг/дм³, никеля – 0,76 мкг/дм³, цинка – 2,58–17,61 мкг/дм³, кадмия – 0,01–0,02 мкг/дм³, хрома – 0,43–0,44 мкг/дм³, меди – 0,84–5,97 мкг/дм³, марганца – 7,61–32,55 мкг/дм³ [29]. Содержание растворимых форм железа достигало 1585,0 мкг/дм³, то есть вид является в высокой степени ферротолерантным [30].

Возобновление вегетативных органов *Potamogeton praelongus*, по нашим данным, ежегодно осуществляется из зимующих почек, образующихся к осени на апексах подземных столонов. В связи с массовым образованием подземных почек в новый вегетационный сезон формируются клоны, в пределах которых проективное покрытие достигает 80–100%. В популяции клоны обычно разделены прогалами, поэтому проективное покрытие доминирующего вида в фитоценозе составляет до 50%.

Такие почки на подземных столонах образуют и другие виды крупных рдестов: рдест блестящий *Potamogeton lucens* L., рдест плавающий *P. natans* L., рдест альпийский *P. alpinus* Balb., рдест злаковый *P. gramineus* L., рдест пронзеннолистный *P. perfoliatus*. На этом основании данная группа видов была отнесена не к корневищным, а к столонным биоморфам [27; 28], поскольку корневищами принято считать многолетние видоизмененные подземные побеги, которые обеспечивают запасание питательных веществ и ежегодное возобновление из формирующихся на них зимующих почек [7; 20; 31; 33]. Биоморфа *P. praelongus* и других видов этой группы в целом индицирует связь с грунтами, имеющими благоприятный газовый режим в течение всего года. Такие грунты (серые и темно-серые тонкодетритные илы) являются достаточно аэрируемыми, не

содержат токсичные газы (в первую очередь сероводород), что позволяет почкам возобновления сохранять жизнеспособность в течение зимнего (подледного) сезона (рис. 5).



**Рис. 5. Схема биоморфы *Potamogeton praelongus*.
Стрелками указаны зимующие почки. Сплошная горизонтальная линия
указывает уровень донного грунта, пунктирная – уровень воды**

Изучение экобиоморф гидрофильных цветковых растений основывается на выявлении наиболее важных признаков биологии, морфологии и экологии видов. К таким признакам принадлежат продолжительность жизненного цикла, структура побегов, тип почек возобновления и их положение в неблагоприятное время года, а также экологическая толерантность видов по отношению к ведущим факторам сред обитания (водной, грунтовой, воздушной). Такой подход позволяет установить экобиоморфологическую специфику каждого исследуемого вида в связи с известными положениями об индивидуальности (неповторимости) биологических видов, их экологических ниш и жизненных форм [3; 23; 24; 25; 32; 36].

Для исследований жизненных форм сосудистых растений первостепенное значение имеет информация о морфологии и сезонной динамике вегетативных органов – корневой и побеговой систем. Важную дополнительную информацию представляют сведения о морфологии репродуктивных структур и их пространственно-временной динамике. Следуя данной концепции, можно отметить, что системы жизненных форм, не учитывающие важные морфологические признаки побеговых и корневых систем видов, являются неинформативными. В работах Е.М. Лавренко и В.М. Свешниковой [18; 19] жизненная форма (экобиоморфа) представлена как адаптационная система, основанная на единстве структурных (морфологических) и физиологических (экологических) особенностей растений. Практическое выделение экобиоморф основывается на знаниях их морфологии и

экологии, то есть жизненная форма предстает как эколого-морфологическая категория [2]. Понятие «экобиоморфа» по содержанию близко к понятию «жизненная форма» в трактовке И.Г. Серебрякова, однако оно полнее отражает экологическую специфику видов, поскольку для выявления экобиоморф требуется также привлечение информации о принадлежности видов к определенным экологическим группам, которые выделяют по отношению к каждому из факторов среды [15]. Синтетическое направление в изучении жизненных форм растений, по Е.М. Лавренко [16; 17], предполагает, что в число параметров экобиоморф видов наряду с биолого-морфологическими следует включать экологические параметры. Экобиоморфологический принцип изучения жизненных форм связывает в единую систему понятия «жизненная форма», «экобиоморфа» и «экологическая ниша». Экобиоморфологическая концепция ориентирована на получение новой информации о морфологической и экологической специфике каждого вида.

Заключение

Редкий в Омской области вид *Potamogeton praelongus* крайне слабо изучен в регионе. Этот вид был включен в дополнительный список растений, нуждающихся в особом внимании к их состоянию в природе, но для включения его в список охраняемых видов региональной Красной книги не было оснований из-за недостатка информации. В ходе полевых исследований в 2023 г. была детально изучена новая стабильная популяция вида в озере на севере лесостепной зоны. При обобщении оригинальных количественных данных, полученных нами на Западно-Сибирской равнине, показано, что *P. praelongus* тесно связан с водными объектами, имеющими активную реакцию воды (рН) в пределах от 6,3 до 7,6, общую жесткость – от 0,26 до 6,40 мг-экв/дм³, общую минерализацию – от 0,03 до 1,10 г/дм³. Именно такие условия представлены в оз. Бугалы Большереченского района, в котором отмечена изученная популяция вида. Озеро расположено в глубокой межгрядной котловине (превышение гряды над уровнем воды достигает 10 м), что обеспечивает значительную стабильность уровня режима. Значительное сплавинообразование указывает, что озеро относится к непересыхающим водным объектам в течение длительного времени. Этот важный параметр наряду с гидрохимическими показателями также объясняет возможность успешного развития популяции вида на тонкодетритных илистых грунтах в диапазоне глубин от 1 до 3 м. Немаловажное значение для сохранения вида имеет удаленность данного местообитания от населенных пунктов. На основе ранее разработанной классификации экобиоморф гидромакрофитов *P. praelongus* оценивается нами как многолетний (вегетативно однолетний), поликарпический, длиннопобеговый, столонный, надводноцветущий, нейтрофильный, типично пресноводный, индифферентный к жесткости воды, ферротолерантный, пелобионтный гидатофит, что существенно уточняет информацию о морфологии и экологии вида. С учетом значительной редкости вида и уникальности единственной детально изученной в регионе популяции *Potamogeton praelongus* может быть рекомендован для включения в очередной выпуск Красной книги Омской области со статусом 3(R) – редкий вид.

Литература

1. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. // ГОСТ Р 52963-2008. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2009. С. 362-392.
2. Голубев В.Н. Об изучении жизненных форм растений // Ботанический журнал. 1968. Т. 53. № 8. С. 1085-1093.
3. Голубев В.Н. Принципы построения и содержание линейной системы жизненных форм покрытосеменных растений // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 1972. Т. 77. Вып. 6. С. 72-80.
4. Дорофеев П.И. Ископаемые Potamogeton (пособие для определения ископаемых плодов). Л.: Наука, 1986. 138 с.
5. Ефремов А.Н. Рдест длиннейший *Potamogeton praelongus* Wulfen // Naturalist. 22.08.2022. <https://www.gbif.org/ru/occurrence/4011647111>
6. Ефремов А.Н., Евженко К.С. Конспект высших водных растений Омской области // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина. 2021. Вып. 93(96). С. 40–58.
7. Жмылев П.Ю., Алексеев Ю.К., Карпухина Е.А., Баландин С.А. Биоморфология растений: иллюстрированный словарь. М.: Изд-во МГУ. 2002. 240 с.
8. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. Л.: Наука, 1981. 187 с.
9. Катанская В.М., Распопов И.М. Методы изучения высшей водной растительности // Руководство по методам гидробиологического анализа вод и донных отложений. Л.: Наука, 1983. С. 129-218.
10. Кашина Л.И. Семейство 24. Potamogetonaceae – Рдестовые // Флора Сибири. Т. 1. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1988. С. 93-105.
11. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом. ПНД Ф 14.1:2.3:4.121-97. М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 2004. 14 с.
12. Количественный химический анализ вод. ПНД Ф 14.1:2.253-09. М.: Люмэкс-маркетинг, 2013. 36 с.
13. Красная книга Омской области. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2005. 460 с.
14. Красная книга Омской области. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2015. 636 с.
15. Крылов А.Г. Жизненные формы лесных фитоценозов. Л.: Наука, 1984. 184 с.
16. Лавренко Е.М. Об уровнях изучения органического мира в связи с познанием растительного покрова // Известия АН СССР. Серия биологическая. 1964. Вып. 1. С. 32-46.
17. Лавренко Е.М. Об уровнях изучения органического мира в связи с познанием растительного покрова // Проблемы современной ботаники. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1965. Т. 2. С. 364-378.
18. Лавренко Е.М., Свешникова В.М. О синтетическом изучении жизненных форм на примере степных дерновинных злаков. Предварительное сообщение // Журнал общей биологии. 1965. Т. 26.3. С. 261-275.

19. Лавренко Е.М., Свешникова В.М. Об основных направлениях изучения экобиоморф в растительном покрове // Основные проблемы современной геоботаники. Л.: Наука, 1968. С. 10-15.
20. Лотова Л.И. Ботаника. Морфология и анатомия высших растений. М.: Ленард, 2017. 512 с.
21. Никитин В.П. Палеокарпология и стратиграфия палеогена и неогена Азиатской России. Новосибирск: Гео, 2006. 229 с.
22. Плантаариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2024. <https://www.plantarium.ru>
23. Работнов Т.А. Об экологической нише у растений // Экология. 1995. 3. С. 246-247.
24. Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
25. Раменский Л.Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Избранные работы. Л.: Наука, 1971. 334 с.
26. Сборник методик выполнения измерений. М.: Аквилон, 2012. 539 с.
27. Свириденко Б.Ф. Жизненные формы цветковых гидрофитов Северного Казахстана // Ботанический журн. 1991. Т. 76. № 5. С. 687-698.
28. Свириденко Б.Ф. Флора и растительность водоемов Северного Казахстана. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2000. 196 с.
29. Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А., Свириденко Т.В., Ефремов А.Н., Токарь О.Е. Содержание тяжелых металлов в экотопах гидромакрофитов Западно-Сибирской равнины // Вестник СурГУ. 2017. Вып. 4(18). С. 81-96.
30. Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А., Свириденко Т.В., Ефремов А.Н., Токарь О.Е. Содержание железа в воде экотопов гидромакрофитов Западно-Сибирской равнины // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2018. № 1. С. 56-61.
31. Серебряков И.Г. Морфология вегетативных органов высших растений. М.: Изд-во Советская наука, 1952. 390 с.
32. Серебряков И.Г. Основные направления эволюции жизненных форм у покрытосеменных растений // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 1955. Т. 60. Вып. 3. С. 71-91.
33. Федоров А.А., Кирпичников М.Э., Артюшенко З.Т. Атлас по описательной морфологии высших растений. Стебель и корень. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 349 с.
34. Цветность поверхностных вод суши. Методика выполнения измерений фотометрическим и визуальным методами. РД 52.24.497-2005. <https://clck.ru/3B4ccY>
35. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
36. Scharfetter R. Biographien von Pflanzensippen. Vien: Springer Verlag, 1953. 546 S.

References

1. Voda. Metody` opredeleniya shhelochnosti i massovoj koncentracii karbonatov i gidrokarbonatov. (2009). *GOST R 52963-2008. Federal'noe agentstvo po texnicheskomu regulirovaniyu i metrologii*. M.: Standartinform6, 362-392. (in Russ.).
2. Golubev, V.H. (1968). Ob izuchenii zhiznenny`x form rastenij. *Botanicheskij zhurnal*, 53(8), 1085–1093. (in Russ.).
3. Golubev, V.H. (1972). Principy` postroeniya i sodержanie linejnoy sistemy` zhiznenny`x form pokry`tosemenny`x rastenij. *Byulleten` MOIP. Otdel biologicheskij*, 77(6), 72-80. (in Russ.).
4. Dorofeev, P.I. (1986). *Iskopaemy`e Potamogeton (posobie dlya opredeleniya iskopaemy`x plodov)*. L.: Nauka. (in Russ.).
5. Efremov A.N. Rdest dlinnejshij *Potamogeton praelongus* Wulfen. *Naturalist*. <https://www.gbif.org/ru/occurrence/4011647111>. (in Russ.).
6. Efremov, A.N., & Evzhenko, K.S. (2021). Konspekt vy`sshix vodny`x rastenij Omskoj oblast. *Trudy` Instituta biologii vnutrennix vod im. I.D. Papanina*, 93(96), 40-58. (in Russ.).
7. Zhmy`lev P.Yu., Alekseev Yu.K., Karpuxina E.A., & Balandin S.A. (2002). *Biomorfologiya rastenij: illyustrirovanny`j slovar`*. M.: Izd-vo MGU. (in Russ.).
8. Katanskaya, V.M. (1981). Vy`sshaya vodnaya rastitel`nost` kontinental`ny`x vodoemov SSSR. *Metody` izucheniya*. L.: Nauka. (in Russ.).
9. Katanskaya, V.M., & Raspopov, I.M. (1983). Metody` izucheniya vy`sshej vodnoj rastitel`nosti. In *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza vod i donny`x otlozhenij* (pp.129-218). L.: Nauka. (in Russ.).
10. Kashirina, L.I. (1988). Semejstvo 24. Potamogetonaceae – Rdestovy`e. In *Flora Sibiri*. (Vol. 1, pp 93-105). Novosibirsk : Nauka. Sibirskoe otделение. (in Russ.).
11. Kolichestvenny`j ximicheskij analiz vod. Metodika vy`polneniya izmerenij rN v vodax potenciometricheskim metodom. (2004). *PND F 14.1:2:3:4.121-97*. M.: Ministerstvo ohrany` okruzhayushhej sredy` i prirodny`x resursov Rossijskoj Federacii. (in Russ.).
12. Kolichestvenny`j ximicheskij analiz vod. (2013). *PND F 14.1:2.253-09*. M.: Lyume`ks-marketing. (in Russ.).
13. *Krasnaya kniga Omskoj oblasti*. (2005). Omsk: Izd-vo OmGPU. (in Russ.).
14. *Krasnaya kniga Omskoj oblasti*. (2015). Omsk: Izd-vo OmGPU. (in Russ.).
15. Kry`lov, A.G. (1984). *Zhiznenny`e formy` lesny`x fitocenzov*. L.: Nauka. (in Russ.).
16. Lavrenko, E.M. (1964). Ob urovnyax izucheniya organicheskogo mira v svyazi s poznaniem rastitel`nogo pokrova. *Izvestiya AN SSSR. Seriya biologicheskaya*, 1, 32-46. (in Russ.).
17. Lavrenko, E.M. (1965). Ob urovnyax izucheniya organicheskogo mira v svyazi s poznaniem rastitel`nogo pokrova. In *Problemy` sovremennoj botaniki*. (Vol. 2, pp. 364-378). M.; L.: Izd-vo AN SSSR. (in Russ.).
18. Lavrenko, E.M., & Sveshnikova, V.M. (1965). O sinteticheskom izuchenii zhiznenny`x form na primere stepny`x dervinny`x zlakov. Predvaritel`noe soobshhenie. *Zhurnal obshhej biologii*, 26(3), 261-275. (in Russ.).

19. Lavrenko, E.M., & Sveshnikova, V.M. (1968). Ob osnovny`x napravleniyax izucheniya e`kobiomorf v rastitel`nom pokrove. In *Osnovny`e problemy` sovremennoj geobotaniki* (pp. 10-15). L.: Nauka. (in Russ.).
20. Lotova, L.I. (2017). *Botanika. Morfologiya i anatomiya vy`sshix rastenij*. M.: Lenard. (in Russ.).
21. Nikitin, V.P. (2006). *Paleokarpologiya i stratigrafiya paleogena i neogena Aziatskoj Rossii*. Novosibirsk: Geo. (in Russ.).
22. *Plantarium. Rasteniya i lishajniki Rossii i sopredel`ny`x stran: otkry`ty`j onlajn atlas i opredelitel` rastenij*. (2007–2024). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.plantarium.ru> (in Russ.).
23. Rabotnov, T.A. (1995). Ob e`kologicheskoy nische u rastenij. *E`kologiya*, 3, 246-247. (in Russ.).
24. Ramenskij, L.G. (1938). *Vvedenie v kompleksnoe pochvenno-geobotanicheskoe issledovanie zemel`*. M.: Sel`hozgiz. (in Russ.).
25. Ramenskij, L.G. (1971) *Problemy` i metody` izucheniya rastitel`nogo pokrova. Izbranny`e raboty`*. L.: Nauka. (in Russ.).
26. *Sbornik metodik vy`polneniya izmerenij*. (2012). M.: Akvilon. (in Russ.).
27. Sviridenko, B.F. (1991). Zhiznenny`e formy` czvetkovy`x gidrofitov Severnogo Kazaxstana. *Botanicheskij zhurn*, 76(5), 687-698/ (in Russ.).
28. Sviridenko, B.F. (2000). *Flora i rastitel`nost` vodoemov Severnogo Kazaxstana*. Omsk: Izd-vo OmGPU. (in Russ.).
29. Sviridenko, B.F., & Murashko, Yu.A., Sviridenko, T.V., Efremov, A.N., Tokar`, O.E. (2017). Soderzhanie tyazhely`x metallov v e`kotoпах gidromakrofitov Zapadno-Sibirskoj ravniny`. *Vestnik SurGU*, 4(18), 81-96. (in Russ.).
30. Sviridenko, B.F., & Murashko, Yu.A., Sviridenko, T.V., Efremov, A.N., Tokar`, O.E. (2018). Soderzhanie zheleza v vode e`kotoпов gidromakrofitov Zapadno-Sibirskoj ravniny`. *Zashhita okruzhayushhej sredy` v neftegazovom komplekse*, 1, 56-61. (in Russ.).
31. Serebryakov, I.G. (1952). *Morfologiya vegetativny`x organov vy`sshix rastenij*. M.: Izd-vo Sovetskaya nauka. (in Russ.).
32. Serebryakov, I.G. (1955). Osnovny`e napravleniya e`volyucii zhiznenny`x form u pokry`tosemenny`x rastenij. *Byulleten` MOIP. Otdel biologicheskij*, 60(3), 71-91. (in Russ.).
33. Fedorov, A.A., Kirpichnikov, M.E., & Artyushenko, Z.T. (1962). *Atlas po opisatel`noj morfologii vy`sshix rastenij. Stebel` i koren`*. M.; L.: Izd-vo AN SSSR. (in Russ.).
34. Czvetnost` poverxnostny`x vod sushi. Metodika vy`polneniya izmerenij fotometricheskimi i vizual`ny`m metodami. RD 52.24.497-2005. (in Russ.) <https://clck.ru/3B4ccY> (in Russ.).
35. Cherepanov, S.K. (1995). *Sosudisty`e rasteniya Rossii i sopredel`ny`x gosudarstv (v predelax by`vshego SSSR)*. SPb.: Mir i sem`ya. (in Russ.).
36. Scharfetter, R. (1953). *Biographien von Pflanzensippen*. Vien: Springer Verlag. (in Germ.).

дата поступления: 16.01.2024

дата принятия: 05.04.2024

© Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А., 2024

Чукина Н.В., Глазырина М.А., Лукина Н.В.

АНАТОМО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЛИСТА *CHIMAPHILA UMBELLATA* НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТВАЛАХ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

N.V. Chukina, M.A. Glazyrina, N.V. Lukina

ANATOMO-MORPHOLOGICAL STRUCTURE FEATURES OF *CHIMAPHILA UMBELLATA* LEAF ON INDUSTRIAL DUMPS (MIDDLE URAL)

Аннотация. На Среднем Урале на зарастающих лесной растительностью промышленных отвалах начинают поселяться типичные лесные виды, одним из которых является *Chimaphila umbellata* (L.) W.P.C. Barton. Внутренняя структура листа, как главного органа фотосинтеза, отражает приспособленность вида к факторам среды. Целью исследования было сравнение анатомо-морфологических особенностей листа *Ch. umbellata*, произрастающей на отвалах горнодобывающей (пустые породы и вскрыши Шабровского тальмагнетитового месторождения) и перерабатывающей (золоотвал Верхнетагильской государственной районной электростанции) промышленности и в естественном лесном фитоценозе на Среднем Урале (подзона южной тайги). Оценку анатомо-морфологических параметров листа проводили на приготовленных поперечных срезах и препаратах эпидермиса с использованием системы обработки изображений Simagis Mesoplant. Исследования показали, что в техногенных условиях у растений *Ch. umbellata* происходило увеличение толщины листовой пластинки, губчатого мезофилла и верхней кутикулы, а также снижение плотности устьиц при увеличении их размеров. Данные изменения связаны с усилением барьерной функции покровных тканей растений, а также оптимизацией процессов газообмена и транспирации в условиях техногенеза. Пластичность фотосинтетического аппарата *Ch. umbellata* способствует успешному выживанию этого вида в неблагоприятных условиях среды трансформированных экосистем.

Ключевые слова: *Chimaphila umbellata*; Pyroleae; анатомия листа; устьичный аппарат; техногенные местообитания.

Сведения об авторах: Чукина Надежда Владимировна, ORCID: 0000-0001-5517-0240, канд. биол. наук; Уральский федеральный

Abstract. Global anthropogenic transformation of natural ecosystems leads to a decrease in the stability of plant communities, partial or complete destruction of vegetation over large areas. In the Middle Urals, significant areas are occupied by dumps of mining and processing industry enterprises. After dumps conservation the process of self-overgrowth of forest phytocenoses is take place by the typical forest species, among which are *Chimaphila umbellata* (L.) W.P.C. Barton. The internal structure of the leaf, as the main organ of photosynthesis, reflects the adaptability of the species to environment. Leaf is also capable to adaptive changes under stressful conditions. In this regard, the structural changes of the photosynthetic apparatus are usfull in bioindication and biomonitoring. The purpose of the study was to compare the leaf anatomical and morphological features of *Ch. umbellata*, growing on the dumps of mining industry (Shabrovsky talc-magnesite deposit), ash dumps (Verkhnetagil'skaya Thermal Power Station) and in the natural forest phytocenosis in the Middle Urals (subzone of the southern Taiga). Leaf anatomical and morphological parameters were studed using the program of the digital image analysis Simagis Mesoplant. The plants of *Ch. umbellata* from anthropogenic habitats were characterized by a higher thickness of leaves, spongy mesophyll and upper cuticle, as well as a decrease in the density of stomata with an increase in their size. These structural changes are associated with strengthening the barrier function of epidermis, as well as the optimization of gas exchange and transpiration processes under technogenesis conditions. The plasticity of the photosynthetic apparatus of *Ch. umbellata* contributes to the successful survival of this species in unfavorable environmental conditions of transformed ecosystems.

Key words: *Chimaphila umbellata*; Pyroleae; leaf anatomy; stomatal apparatus; technogenic habitats.

About the authors: Nadezhda V. Chukina, ORCID: 0000-0001-5517-0240, Candidate of Biological

университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, nady_dicusar@mail.ru; Глазырина Маргарита Александровна, ORCID: 0000-0001-8258-270X, канд. биол. наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, Margarita.Glazyrina@urfu.ru; Лукина Наталия Валентиновна, ORCID: 0000-0001-6425-6214, канд. биол. наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, natalia.lukina@urfu.ru

Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, nady_dicusar@mail.ru; Margarita A. Glazyrina, ORCID: 0000-0001-8258-270X, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, Margarita.Glazyrina@urfu.ru; Natalia V. Lukina, ORCID: 0000-0001-6425-6214, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, natalia.lukina@urfu.ru

Чукина Н.В., Глазырина М.А., Лукина Н.В. Анатомо-морфологические особенности строения листа *Chimaphila umbellata* на промышленных отвалах (Средний Урал) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 49-60. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/05>

Chukina, N.V., Glazyrina, M.A., & Lukina, N.V. (2024). Anatomo-Morphological Structure Features of *Chimaphila Umbellata* Leaf on Industrial Dumps (Middle Ural). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 49-60. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/05>

Введение. Возрастающее с каждым годом антропогенное воздействие на растительный покров Земли приводит к глубоким его изменениям. Источником значительного загрязнения и нарушения природных ландшафтов являются промышленные отвалы, образованные вследствие деятельности предприятий горнодобывающей и перерабатывающей промышленности.

В процессе самозаращения промышленных отвалов на Среднем Урале формируются преимущественно лесные фитоценозы. Растения в этих растительных сообществах часто испытывают воздействие неблагоприятных факторов внешней среды, к которым относят недостаточное увлажнение, засоленность, низкое содержание элементов минерального питания в субстратах и т. д.

Защитой от неблагоприятных факторов среды у растений могут быть как структурные приспособления, так и особенности анатомического строения листьев (развитие кутикулы, механических тканей, изменение толщины эпидермиса, мезофилла и т. д.) [1; 7; 13]. Изучение эпидермиса листьев и особенностей строения устьичного аппарата имеет большое значение в экологии растений. В настоящее время исследуются адаптивные перестройки листа у видов растений, произрастающих в импактных зонах, а также на урбанизированных территориях. Показаны как неспецифические реакции фотосинтетического аппарата, так и видоспецифические адаптивные изменения в структуре мезофилла листа и эпидермиса, а также устьичного аппарата [4; 18; 13; 20-22]. При этом работы, посвященные изучению фотосинтетического аппарата и эпидермальных структур листа у видов, произрастающих на нарушенных промышленностью землях, малочисленны.

Одним из видов, которые поселяются в лесных фитоценозах, формирующихся на промышленных отвалах на Среднем Урале, является *Chimaphila umbellata* (L.) W.P.C. Barton (*Ericaceae* Juss.; триба *Pyroleae* Dumort.) – северо- и центральноевропейско-азиатско-североамериканский вид [16]. Это длиннокорневищный вечнозеленый явнополицентрический кустарничек [3]. Вид способен произрастать на субстратах в диапазоне pH от слабокислых до слабощелочных [12], является индикатором сухих местообитаний [2], из всех грушанковых наиболее требователен к свету [11]. На Урале встречается преимущественно в сосновых борах и вторичных лиственных лесах.

Цель исследования – сравнить анатомо-морфологические особенности листа *Ch. umbellata*, произрастающей на отвалах горнодобывающей и перерабатывающей промышленности и в естественном местообитании на Среднем Урале.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили в июне–августе 2022–2023 гг. в четырех ценопопуляциях (ЦП) *Ch. umbellata* в лесных фитоценозах на рекультивированном (ЦП1) и нереккультивированном (ЦП2) участках золоотвала Верхнетагильской государственной районной электростанции (ВТГРЭС), отвале пустых пород и вскрыши Шабровского тальк-магнезитового камня (ЦП3) и в естественном лесном фитоценозе (ЦПк). Все объекты расположены в зоне умеренно континентального климата (таежная зона, подзона южной тайги) с характерной резкой изменчивостью погодных условий, хорошо выраженными сезонами года (с холодной зимой и теплым летом) [15]. Краткая характеристика отвалов приведена ниже.

Золоотвал ВТГРЭС находится в 5 км от г. Верхний Тагил, в 70 км к северо-западу от г. Екатеринбурга (57°20'45" с. ш. 59°56'46" в. д.; 276 м над ур. м.). Площадь золоотвала составляет 125 га. Образован золой бурых углей Коркинского карьера и Калачевских шахт. Зола содержит малое количество азота и калия, и достаточное фосфатов. Реакция среды зольного субстрата слабощелочная (pH 8,5). Общее содержание микроэлементов в золе выше, чем в почве [8]. В результате проведенных в 1968–1970 гг. рекультивационных мероприятий на золоотвале были созданы различные экотопы: участки с нанесением глинистого грунта полосами (шириной 6–10 м; толщиной 0,10–0,15 м), участки золы без нанесения какого-либо субстрата, оставленные для самозарастания.

Платообразный террасированный отвал пустых пород и вскрыши Шабровского месторождения тальк-магнезитового камня находится в 27 км к югу от г. Екатеринбурга (56°37'45" с. ш. 60°35'59" в. д.; 322 м над ур. м.). Высота отвала достигает 326 м над ур. м., площадь около 1 км². Породы, складываемые в отвалах, сильнокаменистые (каменистость 50–90 %). Оценка агрохимических свойств субстратов отвалов показала, что реакция среды (pH) слабощелочная, обеспеченность азотом и доступными фосфатами очень низкая, обменным калием – средняя и высокая. В породах повышенное содержание Mn, Cr, Cu, Mo, Co, Ni, V, Pb и др. [8].

В качестве контроля была изучена ЦПк *Ch. umbellata* в естественном лесном фитоценозе около п. Исток, расположенном в восточной части г. Екатеринбурга

(56°47'04" с. ш. 60°55'23" в. д.; 309 м н. у. м.). В почвенном покрове района преобладают подзолистые и дерново-подзолистые, суглинистые и глинистые почвы. Основными лесами являются сосновые, но в результате вырубок они сменились на березовые и осиновые [5; 15].

Для сравнения условий произрастания *Ch. umbellata* было проведено геоботаническое обследование лесных фитоценозов детально-маршрутным методом с описанием растительности по общепринятым методикам [10].

Для изучения анатомического строения листьев из каждого местообитания с 10–15 генеративных особей *Ch. umbellata* отбирали по 3–5 сформированных листьев и фиксировали их в 70% этаноле. В камеральных условиях на охлаждающем микротоме были приготовлены поперечные срезы листьев, с которых измеряли следующие параметры: толщина листа, мезофилла, верхнего и нижнего эпидермиса, кутикулы; толщина столчатого и губчатого мезофилла ($N=30$, для каждого параметра). На препаратах эпидермиса проводили подсчет количества устьиц в единице площади (шт/мм²) и измеряли их размеры ($N=30$, для каждого параметра). Размеры клеток палисадного и губчатого мезофилла определяли в суспензии клеток в растворе 5 % хромового ангидрида в 1 N HCl, согласно методике [6; 9]. Размеры хлоропластов измеряли на поперечных срезах листьев, объем хлоропласта вычисляли по формуле эллипсоида вращения. Все измерения проводили с использованием системы анализа изображений Simagis Mesoplant (ООО «СИАМС», Россия) и светового микроскопа Meiji MT 4300L («Meiji Techno», Япония).

Для обработки полученных данных использовали программный пакет MS Office (Excel 2016) и Statistica 12.0. Достоверность различий оценивали по критерию Манна–Уитни при уровне значимости $p < 0,05$. В таблице и на рисунке 1 представлены средние значения и ошибки среднего. Разными буквами отмечены достоверные различия между изученными ценопопуляциями (смотри примечания к таблицам и рисункам). Дискриминантный анализ проводили в Statistica 12.0

Результаты исследования и их обсуждение. Исследования показали, что в техногенно-нарушенных и в естественном местообитаниях *Ch. umbellata* произрастала небольшими группами в смешанных лесных фитоценозах с доминированием *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth и *Populus tremula* L., сомкнутость крон древесного яруса варьировала от 0,6 до 0,8. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (47,3%) и число видов на единицу площади (9,6 шт/0,25 м²) в естественном лесу были выше, чем на отвалах (27,3–41,1% и 4,6–5,6 шт/0,25 м² соответственно). Численность побегов данного вида на нарушенных территориях изменялась от 24 шт/200 м² (ЦП1) до 222 шт/200 м² (ЦП3), в контроле – 148 шт/200 м² (ЦПк). Средняя плотность ЦП на отвалах была ниже (в ЦП3 – 10,09 шт/0,25 м²; в ЦП2 – 3,44 шт/0,25 м²), чем в контроле (13,46 шт/0,25 м²). Субстраты отвалов отличались более низким содержанием элементов минерального питания растений и повышенным содержанием металлов по сравнению с естественным лесным фитоценозом [8].

Известно, что фотосинтетическая функция растений реализуется листьями. В связи с чем, анатомо-морфологические особенности строения листа являются результатом адаптации растений к факторам окружающей среды (свет, температура, влажность и т. д.).

Площадь листьев растений *Ch. umbellata* во всех изученных ЦП варьировала от 1,6 до 4,5 см². Установлено, что для данного вида растений характерен дорсовентральный тип строения мезофилла: хорошо выражены два–три слоя палисадного мезофилла, толщина и объем клеток которого в ЦП1–ЦП3 и ЦПк достоверно не различались (табл.). Клетки губчатого мезофилла расположены под слоем палисадного мезофилла рыхло, в связи с чем в листе хорошо развита система межклетников. Показано, что толщина губчатого мезофилла в листьях растений, произрастающих на отвалах, была достоверно больше, чем в контрольном местообитании. Вместе с тем, объем клеток губчатого мезофилла в листьях растений из ЦП1–ЦП3 был на 25 % меньше, чем в растениях из естественного лесного фитоценоза. Достоверных различий по объему хлоропластов у растений из исследованных местообитаний обнаружено не было. Это свидетельствует о стабильности размеров пластид, которые мало подвержены фенотипическим изменениям [9], что согласуется с ранее полученными нами данными [14].

Таблица

Параметры мезоструктуры листа *Ch. umbellata* из изученных ценопопуляций, произрастающих на Среднем Урале

Показатели	ЦП	Хср.±m	lim
Толщина листа, мкм	ЦП1	426,8±2,8bc	404,0–451,0
	ЦП2	433,9±3,3c	401,0–460,0
	ЦП3	419,3±3,7b	377,0–445,0
	ЦПк	388,5±5,9a	326,0–446,9
Толщина палисадного мезофилла, мкм	ЦП1	113,0±1,5a	93,0–130,0
	ЦП2	107,1±2,0a	86,0–128,0
	ЦП3	103,3±1,6a	86,0–129,0
	ЦПк	105,7±2,6a	80,0–130,0
Толщина губчатого мезофилла, мкм	ЦП1	262,5±2,9b	237,4–292,3
	ЦП2	275,9±3,4c	241,0–309,0
	ЦП3	263,0±3,5b	224,4–300,0
	ЦПк	237,7±4,4a	193,0–291,0
Толщина верхнего эпидермиса, мкм	ЦП1	16,70±0,24a	14,30–19,20
	ЦП2	16,91±0,24a	14,50–19,30
	ЦП3	17,08±0,33a	14,60–20,00
	ЦПк	16,18±0,51a	9,80–19,80
Толщина кутикулы на верхней стороне листа, мкм	ЦП1	11,23±0,19b	9,30–13,0
	ЦП2	10,99±0,17b	9,40–12,90
	ЦП3	11,17±0,15b	10,00–12,40
	ЦПк	8,05±0,21a	6,90–11,60
Толщина нижнего эпидермиса (с кутикулой), мкм	ЦП1	23,79±0,38a	20,00–26,00
	ЦП2	22,93±0,45a	19,00–27,00
	ЦП3	23,67±0,27a	21,00–26,00
	ЦПк	22,95±0,54a	17,00–25,80
Объем клеток палисадного мезофилла, тыс, мкм ³	ЦП1	27,37±1,36a	14,62–37,81
	ЦП2	27,01±1,37a	15,12–42,90

	ЦПЗ	26,12±6,50a	14,61–46,72
	ЦПк	26,57±1,58a	10,75–46,56
Объем клеток губчатого мезофилла, тыс, мкм ³	ЦП1	25,00±2,35a	7,32–48,94
	ЦП2	26,18±1,76a	11,89–50,95
	ЦПЗ	22,00±1,53a	11,31–45,06
	ЦПк	30,70±2,12b	12,82–60,15
Объем хлоропласта, мкм ³	ЦП1	41,78 ±1,96a	25,51–68,16
	ЦП2	43,60±1,45a	29,23–61,92
	ЦПЗ	40,89±1,80a	25,38–65,37
	ЦПк	43,94±2,46a	24,55–67,72

Примечание: разные буквы (a, b, c) в столбцах (Хср.±m) указывают на достоверные различия по каждому показателю между исследованными ЦП, одинаковые буквы – на отсутствие различий при уровне значимости $p < 0,05$.

Наиболее общей реакцией, возникающей у растений в процессе приспособления к стрессовым условиям обитания, является развитие ксероморфной структуры листьев, что может служить индикатором загрязнения окружающей среды [13]. Согласно полученным нами данным, у растений *Ch. umbellata*, произрастающих на отвалах, толщина листа была достоверно больше, чем у растений в естественном лесу (ЦПк) (в среднем на 10 %) (табл.). Аналогичные изменения обнаружены у орхидей, произрастающих на техногенных субстратах, а также у древесных видов растений, в условиях аэротехногенного загрязнения [4; 14].

Эпидермис листа *Ch. umbellata* однослойный, высота клеток верхнего эпидермиса у растений в ЦП1–ЦПЗ и ЦПк достоверно не различались (табл.). При этом, на верхней стороне листа хорошо выражен слой кутикулы, толщина которой в ЦП1–ЦПЗ больше, чем в ЦПк. Усиление барьерной функции эпидермы за счет увеличения кутикулярного слоя также отмечено в литературе [19]. Толщина нижнего эпидермиса с кутикулой во всех ЦП не различалась, и составляла, в среднем, $23,3 \pm 2,4$ мкм.

Известно, что устьица являются структурными элементами эпидермиса листа, через которые осуществляются процессы газообмена и транспирации. Размеры устьиц, а также их число на единицу площади листа видоспецифичны и зависят от факторов среды. Так, например, в засушливых местообитаниях растения оптимизируют величину устьичной проводимости, сочетая увеличение плотности устьиц с уменьшением их линейных размеров. По мнению ряда авторов, данные изменения обеспечивают более короткий путь диффузии углекислоты внутрь листа при фотосинтезе, а также паров воды с поверхности листа, что и способствует поддержанию оптимального уровня газообмена в растении. Сходные адаптивные реакции обнаруживаются у растений в ответ на аэротехногенное загрязнение среды [17; 19]. Полагают, что данные адаптивные реакции направлены на активное ограничение влияния стрессового фактора и уменьшение проникновения токсикантов внутрь ассимиляционного аппарата листа [13].

У *Ch. umbellata* устьица непогруженные, расположены только на нижней стороне листа. По числу устьиц в расчете на единицу площади листа растения из исследованных местообитаний имели существенные различия. Количество устьиц на мм² в листьях

растений, произрастающих на отвалах (ЦП1, ЦП2, ЦП3), было достоверно меньше, чем у растений из контрольного местообитания (ЦПк) (в среднем в 1,5 раза). При этом площадь устьиц у растений с отвалов была на 34 % выше, чем у растений из естественного лесного фитоценоза (ЦПк). Установлено, что растения *Ch. umbellata* из изученных ЦП по суммарной площади устьиц в листе достоверно не различались, и в среднем этот показатель составлял $17,5 \pm 0,3 \text{ мм}^2$ (рис. 1).

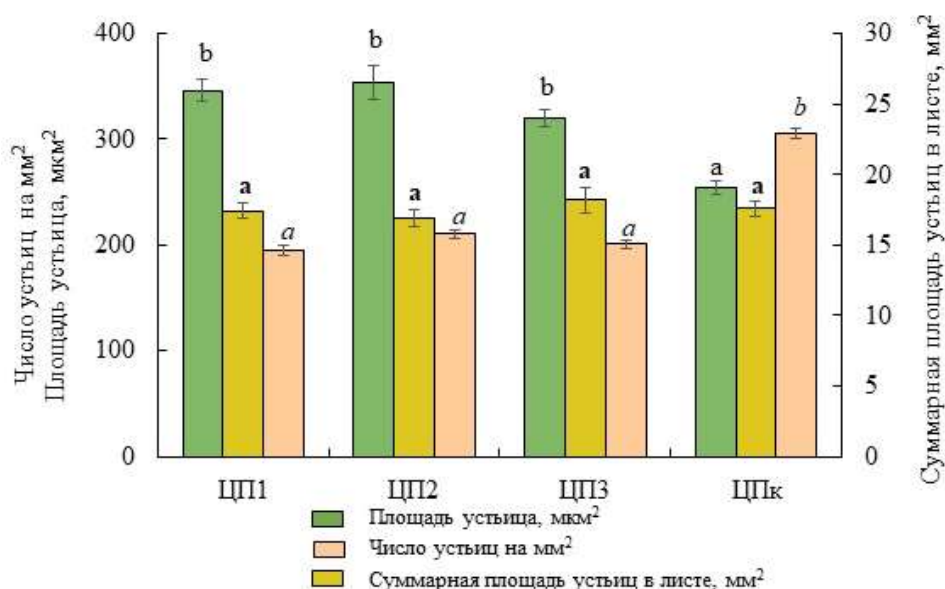


Рис. 1. Параметры устьиц листа *Ch. umbellata* из изученных ценопопуляций, произрастающих на Среднем Урале. Разные буквы указывают на достоверные различия площади устьиц (a, b), числа устьиц (a, b) между исследованными ЦП; одинаковая буква (a) по показателю суммарной площади устьиц во всех ЦП обозначает отсутствие достоверных отличий по этому показателю между исследованными ЦП при уровне значимости $p < 0,05$

Таким образом, изменение параметров устьичного аппарата листа у растений *Ch. umbellata* свидетельствует об их адаптивном характере. Вероятно, растения данного вида, произрастающие на техногенных субстратах, компенсируют снижение плотности устьиц в листе увеличением их размеров, что позволяет им осуществлять нормальный уровень газообмена и транспирации. Полученные нами результаты согласуются с исследованиями устьичного аппарата древесных растений в условиях техногенной среды [18; 20-22].

Дискриминантный анализ, проведенный с использованием таких анатомических признаков, как число устьиц на единицу площади, средняя площадь устьица, толщина листа, толщина мезофилла, толщина губчатой паренхимы, отделил ЦПк от ЦП1–ЦП3 по дискриминантной функции 1 (рис. 2). Корректность отнесения в группы составляла: ЦПк – 100%, ЦП1 – 60%, ЦП2 – 45%, ЦП3 – 50%.

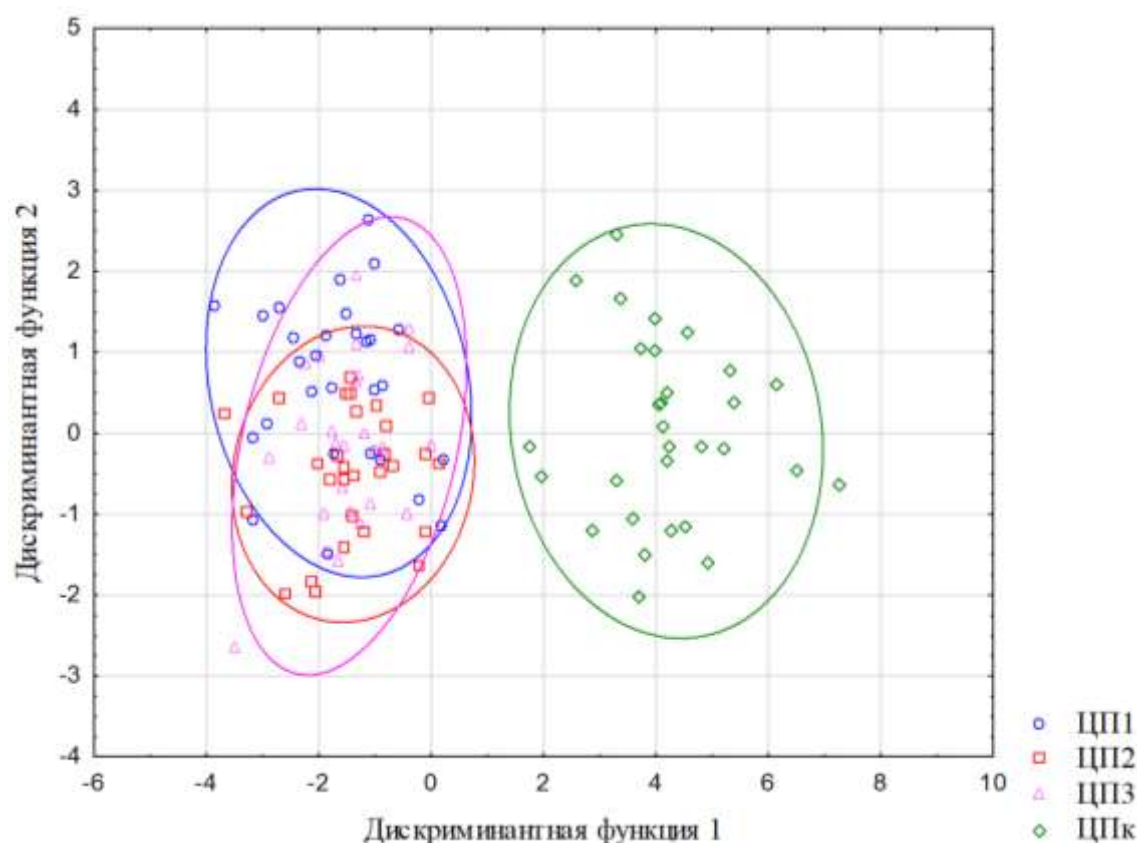


Рис. 2. Дискриминантный анализ изученных ценопопуляций *Ch. umbellata*, произрастающих на Среднем Урале (Wilks' Lambda=0,09990, F=15,126, при $p<0,0000$)

Заключение. В настоящем исследовании выявлены адаптивные структурные перестройки фотосинтетического аппарата растений *Ch. umbellata*, которые позволяют данному виду успешно колонизировать техногенные субстраты на Среднем Урале.

К числу таких защитно-приспособительных реакций относятся: увеличение толщины листовой пластинки, губчатого мезофилла и верхней кутикулы, снижение плотности устьиц при увеличении их размеров. Данные изменения связаны с усилением барьерной функции покровных тканей листа, а также оптимизацией процессов газообмена и транспирации в условиях техногенеза.

Оценка адаптивных возможностей и потенциала устойчивости растений позволяет решать разнообразные фундаментальные и прикладные задачи, а также прогнозировать поведение видов и состояние экосистем при возрастании техногенных нагрузок. Планируется дальнейший мониторинг состояния локальных популяций *Ch. umbellata* на территории Уральского региона, а также оценка их физиолого-биохимических показателей, что позволит установить более четкую связь с условиями окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания УрФУ FEUZ-2023-0019.

Литература

1. Бабушкина Е.А., Гордеева М.И., Богушевский А.С. Изменчивость характеристик транспирационного аппарата листьев кустарников под влиянием контрастных условий произрастания // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 31. С. 96-98.
2. Багдасарова Т.В. Зимолубка зонтичная // Биологическая флора Московской области. 1993. Вып. 9. Ч. 2. С. 71-77.
3. Бобров Ю.А. Грушанковые России. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2009. 137 с.
4. Василевская Н. В., Лукина Ю. М. Влияние техногенного загрязнения на динамику роста и мезоструктуру листьев *Betula czerepanovii* Orlova // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8. С. 14-18.
5. Гафуров Ф.Г. Почвы Свердловской области. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. 396 с.
6. Иванова Л.А., Пьянков В.И. Структурная адаптация мезофилла листа к затенению // Физиология растений. 2002. Т. 49. С. 467-480.
7. Карнаухова Н.А., Селютина И.Ю., Дорогина О.В. Анатомо-морфологическая изменчивость сибирских видов секции *Multicaulia* рода *Hedysarum* (*Fabaceae*) // Turczaninowia. 2020. Т. 23, № 3. С. 147-157. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.23.3.14>
8. Махонина Г.И. Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. 355 с.
9. Мокроносов А.Т., Борзенкова Р.А. Методика количественной оценки структуры и функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1978. Т. 61. С. 119-133.
10. Полевая геоботаника: в 5 т. М.; Л.: Наука, 1964. Т. 3. 530 с.
11. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Биология растительных систем. Красноярск: СибГТУ, 2013. 120 с.
12. Таршис Л.Г. Об изменчивости морфологических и анатомических признаков у видов подсемейства *Pyroloideae* (*Ericaceae*) на Урале // Ботанический журнал. 2005. № 8. С. 1197-1208.
13. Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера. 2021. Т. 13, № 3. С. 86-100.
14. Чукина Н.В., Борисова Г.Г., Малева М.Г., Лукина Н.В., Синенко О.С., Филимонова Е.И., Елькина А.В. Особенности мезоструктуры листа и фотосинтез у орхидеи *Platanthera bifolia* в условиях золоотвала // Субтропическое и декоративное садоводство. 2021. № 78. С. 142-150.
15. Шакиров А.В. Физико-географическое районирование Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 617 с.
16. Chase M., Christenhusz M.J. M., Fay M.F., Byng J.W., Judd W.S., Soltis D.E., Mabberley D.J., Sennikov A.N., Soltis P.S., Stevens P.F., Briggs B., Brockington S., Chautems A., Clark J.C., Conran J., Haston E., Möller M., Moore M., Olmstead R., Perret M. An update of the Angiosperm

Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV // Botanical Journal of the Linnean Society. 2016. Vol. 181. Iss. 1. Pp. 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>

17. Chwil S., Kozłowska-Strawska J., Tkaczyk P., Chwil P., Matraszek R. Assessment of air pollutants in an urban agglomeration in Poland made by the biomonitoring of trees // Journal of Elementology. 2015. Vol. 20, No 4. Pp. 813–826.

18. Pourkhabbaz A., Rastin N., Olbrich A., Langenfeld-Heyser R., Polle A. Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2010. Vol. 85, No 3. Pp. 251-255. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0047-4>

19. Rashidi F., Jalili A., Kafaki S. B., Sagheb-Talebi K., Hodgson J. Anatomical responses of leaves of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to urban pollutant gases and climatic factors // Trees. 2012. Vol. 26. P. 363-375. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0598-y>

20. Shaheen A.M., Al-Toukhy A.A., Hajar A.S. Effect of Air Pollution on Leaf Traits of Three Tree Species Growing in the Industrial zone of Jeddah, Saudi Arabia // Journal of King Abdulaziz University-Meteorology Environment and Arid Land Agriculture Sciences. 2016. Vol. 26, No 2. Pp. 33-40. <https://doi.org/10.4197/Met.26-2.4>

21. Shrestha S.D., Devkota A., Jha P.K. Assessment of Air Pollution Impact on Micro-Morphological and Biochemical Properties of *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels and *Lagerstroemia indica* L. // Scientific World. 2021. Vol. 14, No 14. Pp. 132-140. <https://doi.org/10.3126/sw.v14i14.35024>

22. You H.N., Kwak M.J., Je S.M., Lee J.K., Lim Y.J., Kim H., Park S., Jeong S.G., Choi Y.S., Woo S.Y. Morpho-Physio-Biochemical Attributes of Roadside Trees as Potential Tools for Biomonitoring of Air Quality and Environmental Health in Urban Areas // Land. 2021. Vol. 10, No 236. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/land10030236>

References

1. Babushkina, E.A., Gordeeva, M.I., & Bogushevskij A.S. (2012). Izmenchivost` xarakteristik transpiracionnogo apparata list`ev kustarnikov pod vliyaniem kontrastny`x uslovij proizrastaniya. Aktual`ny`e problemy` lesnogo kompleksa, 31, 96-98. (in Russ.).

2. Bagdasarova, T.V. (1993). Zimolyubka zontichnaya. *Biologicheskaya flora Moskovskoj oblasti*, 9(2), 71-77. (in Russ.).

3. Bobrov, Yu.A. (2009). *Grushankovy`e Rossii*. Kirov: Izd-vo VyatGGU (in Russ.)

4. Vasilevskaya, N.V., Lukina, & Yu.M. (2011). Vliyanie texnogenennogo zagryazneniya na dinamiku rosta i mezostrukturu list`ev *Betula czerepanovii* Orlova. *Ucheny`e zapiski petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 8, 14-18. (in Russ.).

5. Gafurov, F.G. (2008). *Pochvy` Sverdlovskoj oblasti*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta. (in Russ.).

6. Ivanova, L.A., & P`Yankov, V.I. (2002). Strukturnaya adaptaciya mezofilla lista k zateneniyu. *Fiziologiya rastenij*, 49, 467-480. (in Russ.).

7. Karnauxova, N.A., Selyutina, I.Yu., & Dorogina, O.V. (2020). Anatomico-morfologicheskaya izmenchivost' sibirskix vidov sekcii Multicaulia roda *Hedysarum* (Fabaceae). *Turczaninowia*, 23(3), 147-157. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.23.3.14> (in Russ.).
8. Maxonina, G.I. (2003). *E'kologicheskie aspekty' pochvoobrazovaniya v texnogenny'x e'kosistemax Urala*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta. (in Russ.).
9. Mokronosov, A.T., & Borzenkova, R.A. (1978). Metodika kolichestvennoj ocenki struktury' i funkcional'noj aktivnosti fotosinteziruyushhix tkanej i organov // *Trudy' po prikladnoj botanike, genetike i selekcii*, 61, 119-133. (in Russ.).
10. *Polevaya geobotanika* (Vol. 3). (1964). M.; L.: Nauka. (in Russ.).
11. Sunczova, L.N., & Inshakov, E.M. (2013). *Biologiya rastitel'ny'x system*. Krasnoyarsk: SibGTU. (in Russ.).
12. Tarshis, L.G. (2005). Ob izmenchivosti morfologicheskix i anatomicheskix priznakov u vidov podsejstva *Pyroloideae* (Ericaceae) na Urale. *Botanicheskij zhurnal*, 8, 1197-1208. (in Russ.).
13. Urazgil'din, R.V., & Kulagin, A.Yu. (2021). Texnogenez i strukturno-funkcional'ny'e reakcii drevesny'x vidov: povrezhdeniya, adaptacii, strategii. Vliyanie na makro- i mikromorfologiyu assimilyacionnogo apparata (Ch. 1). *Biosfera*, 13(3), 86-100. (in Russ.).
14. Chukina, N.V., Borisova, G.G., Maleva, M.G., Lukina, N.V., Sinenko, O.S., Filimonova, E.I., & El'kina, A.V. (2021). Osobennosti mezostrukturny' lista i fotosintez u orxidei *Platanthera bifolia* v usloviyax zolootvala. *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo*, 78, 142-150 (in Russ.).
15. Shakirov, A.V. (2011). *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Urala*. Ekaterinburg: UrO RAN. (in Russ.).
16. Chase, M., Christenhusz, M.J. M., Fay, M.F., Byng, J.W., Judd, W.S., Soltis, D.E., Mabberley, D.J., Sennikov, A.N., Soltis, P.S., Stevens, P.F., Briggs, B., Brockington, S., Chautems, A., Clark, J.C., Conran, J., Haston, E., Möller, M., Moore, M., Olmstead, R., & Perret, M. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1-20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
17. Chwil, S., Kozłowska-Strawska, J., Tkaczyk, P., Chwil, P., & Matraszek, R. (2015). Assessment of air pollutants in an urban agglomeration in Poland made by the biomonitoring of trees. *Journal of Elementology*, 20(4), 813-826.
18. Pourkhabbaz, A., Rastin, N., Olbrich, A., Langenfeld-Heyser, R., & Polle, A. (2010). Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85(3), 251-255. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0047-4>
19. Rashidi, F., Jalili, A., Kafaki, S.B., Sagheb-Talebi, K., & Hodgson, J. (2012). Anatomical responses of leaves of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to urban pollutant gases and climatic factors. *Trees*, 26, 363-375. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0598-y>
20. Shaheen, A.M., Al-Toukhy, A.A., & Hajar, A.S. (2016). Effect of Air Pollution on Leaf Traits of Three Tree Species Growing in the Industrial zone of Jeddah, Saudi Arabia. *Journal of King*

Abdulaziz University-Meteorology Environment and Arid Land Agriculture Sciences, 26(2), 33-40.
<https://doi.org/10.4197/Met.26-2.4>

21. Shrestha, S.D., Devkota, A., & Jha, P.K. (2021). Assessment of Air Pollution Impact on Micro-Morphological and Biochemical Properties of *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels and *Lagerstroemia indica* L. *Scientific World*, 14(14), 132-140. <https://doi.org/10.3126/sw.v14i14.35024>

22. You, H.N., Kwak, M.J., Je, S.M., Lee, J.K., Lim, Y.J., Kim, H., Park, S., Jeong, S.G., Choi, Y.S., & Woo, S.Y. (2021). Morpho-Physio-Biochemical Attributes of Roadside Trees as Potential Tools for Biomonitoring of Air Quality and Environmental Health in Urban Areas. *Land*, 10(236), 1-14. <https://doi.org/10.3390/land10030236>

дата поступления: 22.02.2024

дата принятия: 27.04.2024

© Чукина Н.В., Глазырина М.А., Лукина Н.В., 2024

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАКТОРА – ТРЕМАТОДЫ *OPISTHORCHIS FELINEUS* НА СИСТЕМУ РЕГУЛЯЦИИ ПРОЛИФЕРАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ СОМАТИЧЕСКИХ КЛЕТОК ОРГАНИЗМА

A.G. Rybka

IMPACT OF THE NATURAL ENVIRONMENTAL FACTOR - TREMATODE *OPISTHORCHIS FELINEUS* ON THE SYSTEM OF REGULATION OF PROLIFERATIVE ACTIVITY OF SOMATIC CELLS

Аннотация. Одним из ведущих эпигенетических факторов канцерогенеза является высокий уровень пролиферативной активности соматических клеток. Активацию пролиферации холангиоцитов на фоне инвазии организма трематодой *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884) описывают многие исследователи. В настоящем исследовании показана роль метаболитов метацеркариев и описторхов в индукции пролиферативной активности соматических клеток гепатобилиарной системы и других органов. Рассмотрено значение клеточно-тканевых биорегуляторов в возрастании уровня пролиферативной активности различных тканей у инвазированных трематодой организмов. Из полученных на модели гепатоцеллюлярной ткани данных следует, что к кейлон-содержащему фактору из ткани печени здоровых животных, как ингибитору клеточно-тканевой пролиферации, более чувствительными оказались гепатоциты неинвазированных описторхами инбредных мышей по сравнению с животными, инвазированными указанным биотическим патогеном в течение 2-х месяцев. Уровень биологической активности исследуемого тканеспецифического эффектора, выделенного из ткани печени мышей с тем же сроком инвазии описторхами, является более низким, чем в группе неинвазированных животных. Отсюда следует, что активация клеточно-тканевой пролиферации инвазированных описторхами животных, обусловлена нарушением механизмов регуляции клеточно-тканевого гомеостаза. Снижение функции контроля над митотическим циклом соматических клеток при паразитировании в гепатобилиарной системе организма трематоды *Opisthorchis felineus* подтверждается возрастанием скорости роста сингенных злокачественных опухолей, а также модификацией эффекта гомологичного лейкоцитарного интерферона из ингибитора злокачественного процесса – в

Abstract. One of the leading epigenetic factors of canerogenesis is a high level of proliferative activity of somatic cells. Activation of cholangiocyte proliferation against the background of organismal invasion by trematode *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884) is described by many researchers. The present study shows the role of metabolites of metacercariae and opisthorchis in the induction of proliferative activity of somatic cells of the hepatobiliary system and other organs. The significance of cell-tissue bioregulators in increasing the level of proliferative activity of various tissues in trematode-infected organisms has been considered. It follows from the data obtained on the model of hepatocellular tissue that kylon-containing factor from liver tissue of healthy animals, as an inhibitor of cell-tissue proliferation, was more sensitive to hepatocytes of uninvaded inbred mice as compared to the animals invaded with the above biotic pathogen for 2 months. The level of biological activity of the studied tissue-specific effector isolated from the liver tissue of mice with the same period of opistorch invasion is lower than in the group of uninvaded animals. Hence, it follows that activation of cell-tissue proliferation in opistorch-infected animals is caused by disturbed regulation mechanisms of cell-tissue homeostasis. Decrease in the function of control over somatic cell mitotic cycle during parasitization in the hepatobiliary system of *Opisthorchis felineus* trematode is confirmed by increase in growth rate of syngeneic malignant tumors as well as modification of homologous leukocyte interferon effect from inhibitor of malignant process – to activator. Induction of intensive regenerative

активатора. Индукция метаболитами описторхов интенсивной регенераторной пролиферации холангиоцитов в результате дисфункции механизмов их клеточно-тканевой регуляции – является промоторным фактором процесса онкогенеза.

Ключевые слова: пролиферативная активность; холангиоциты; кейлон-содержащий фактор; клеточно-тканевые биорегуляторы; промоторный фактор; холангиоканцерогенез; метаболиты; описторхи; метациркарин; хронический описторхоз.

Сведения об авторе: Рыбка Ангелина Григорьевна, ORCID: 0000-0002-1692-3825, eLibrary SPIN-код 3087-4359, канд. биол. наук, Тюменский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Тюмень, Россия, fond.quality.life@rambler.ru

proliferation of cholangiocytes by opisthorchial metabolites as a result of dysfunction of their cell-tissue regulation mechanisms is a promoter factor of oncogenesis process.

Key words: proliferative activity; cholangiocytes; kylon-containing factor; cell-tissue bioregulators; promoter factor; cholangiocarcinogenesis; metabolites; opisthorches; metacercariae; chronic opisthorchiasis.

About the author: Angelina G. Rybka, ORCID: 0000-0002-1692-3825, eLibrary SPIN code: 3087-4359, Candidate of Biological Sciences, Tyumen State Medical University, Ministry of Health of Russia, Tyumen, Russia, fond.quality.life@rambler.ru

Рыбка А.Г. Воздействие природного экологического фактора – трематоды *Opisthorchis felinus* на систему регуляции пролиферативной активности соматических клеток организма // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 61-75. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/06>

Rybka, A.G. (2024). Impact of Natural Environmental Factor – Trematode *Opisthorchis felinus* on the System of Regulation of Proliferative Activity of Somatic Cells. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 61-75. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/06>

Введение. Литературные сведения о роли природного экологического фактора Тюменского региона – описторхозной инвазии в развитии первичного холангиоцеллюлярного рака печени многочисленны и подтверждаются исследованиями [1; 3; 24; 26; 34; 35]. На основании гиперэндемичности указанной территории по паразитированию в гепатобилиарной системе организма человека биотического патогена - гельминта *Opisthorchis felinus* (Rivolta, 1884), хронический описторхоз рассматривается как факультативный предрак печени [26]. Однако, механизмы промоторного действия хронической инвазии трематоды *Opisthorchis felinus* на холангиоканцерогенез изучены недостаточно.

В основе возникновения в организме многих патологических процессов, в том числе и злокачественного, лежит нарушение регуляции размножения соматических клеток (СК), т.е. тканевого гомеостаза. В этом случае формируется среда, детерминирующая пролиферативную активность СК, их трансформацию [9; 24]. Установлено, что хроническая описторхозная инвазия организма трематодой *Opisthorchis felinus* сопровождается активной пролиферацией клеток желчных протоков, перихолангиофиброзом, метаплазией и аденоматозом протокового эпителия [1; 3; 8; 9; 24; 26; 34; 35; 37].

Регуляция интенсивности клеточной пролиферации опосредуется медиаторами, которые синтезируются соматическими клетками различных тканей, в т. ч. злокачественными. Одним из таких медиаторов является тканевой фактор (кейлоны, КФ), продуцируемый дифференцированными клетками и ингибирующий пролиферацию клеток на основе биологического принципа обратной связи. Обладает тканеспецифичностью [11; 20].

Тот факт, что описторхозная инвазия индуцирует в тканях организма активацию процессов клеточной пролиферации, даёт основание полагать о нарушении механизмов регуляции тканевого гомеостаза, в том числе рост-ингибирующим тканеспецифичным кейлонным фактором. Однако, указанные механизмы регуляции клеточно-тканевой пролиферации при описторхозной инвазии изучены недостаточно, практически в научной литературе такие данные не встречаются. В связи с этим целью экспериментального исследования явилось изучение процессов пролиферации тканей, ингибирующего их активность экзогенного тканеспецифичного мембранотропного кейлон-содержащего фактора и чувствительности к нему соматических клеток при инвазии организма гельминтом *Opisthorchis felineus*.

Методы и материалы. Научно-исследовательские работы произведены в лаборатории канцерогенеза кафедры онкологии ФГБОУ ВО Тюменского ГМУ Минздрава России. В качестве объектов исследования для изучения влияния описторхозной инвазии на системы регуляции гомеостаза организма использовали мышей инбредных линий: F1 [CBA/Lac x C57B1/6], CBA/Lac, DBA/2, Balb/c, A/sn (Y). Объекты исследования, полученные из коллекции ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России – сингенные перевивные *in vivo* опухолевые штаммы: рак шейки матки -5 (РШМ-5), карцинома толстой кишки (АКАТОЛ).

С целью исключения механического прессинга гельминтов на протоковый эпителий и изучения *in vivo* биологического воздействия собственно метаболитов метацеркариев и описторхов на холангиоциты, гепатоциты и другие СК - была выбрана модель дистанционного тестирования эффекта воздействия метаболитов на ткани организма путём культивирования зрелых личинок и морит в диффузионных камерах в/б с использованием инбредных мышей (Y).

Выделенные из рыбы стандартным методом метацеркарии с помощью глазной пипетки вводили в ротовую полость мышам (25–30 шт. в 0,9% NaCl). Инвазия животных описторхами валидировалась наличием гельминтов (взрослых особей) в гепатобилиарном тракте [21].

Проллиферативная активность (ПА) соматических клеток во всех экспериментах изучалась по включению H^3 -тимидина в ДНК и радиометрии в жидком сцинтилляторе (β -счетчик, имп./сек.), а также с помощью автордиографии (индекс меченных ядер, ИМЯ). В экспериментах за 1 час до эвтаназии мышам *in vivo* вводили H^3 -тимидин. Ткани

выделенных органов животных для автордиографии фиксировали в 10,0% растворе нейтрального формалина.

Клеточно-тканевой биорегулятор (кейлонный фактор, КФ), для изучения его биологического воздействия на соматические клетки, экстрагировали из водного гомогената тканей органов инбредных мышей путём осаждения гликопротеидных фракций 70–81% этанолом. Выделенные фракции лиофилизировали. Лيوфилизированный экстракт использовали для биологического тестирования уровня активности тканевых кейлонов и чувствительности к ним соматических клеток. Исследования производили на инбредных животных с частичной резекцией печени.

Эвтаназия мышей производилась методом цервикальной дислокации. Для статистических расчётов использовали стандартные методы. Оценку достоверности результатов (p) производили согласно t – критерию Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение. В результате экспериментальных исследований на инбредных мышах с использованием культуры метацеркарий и описторхов в диффузионных камерах *in vivo* было установлено, что возрастание ПА в соматических клетках гепатобилиарной системы (гепатоциты, холангиоциты) и других органах (почки, поджелудочная железа, селезёнка, лимфоузлы и др.) индуцируется метаболитами метацеркарий и, в последующем, описторхов [21].

Также, полученные данные при 2-х месячной инвазии мышей F1 [СВА/Лас x C57B1/6] экопатогенным паразитом *Opisthorchis felineus* показали значительное возрастание ПА тканей следующих органов: печени – на 36,0%; почек – на 42,3%; желудка – на 88,5%; поджелудочной железы – на 32,9%; селезенки – на 26,3%. Результаты с аналогичной тенденцией были получены и на мышах линии СВА/Лас.

При длительном паразитировании описторхов в гепатобилиарной системе мышей линии ♂ СВА/Лас (4 мес.) установлено, что ПА эпителия холедоха согласно результатам полученного митотического индекса (МИ) увеличивается на 41,2% (МИ $1,2 \pm 0,01$ против $0,85 \pm 0,01$; $p < 0,001$), а эпителия внутрипеченочных протоков – на 45% (МИ $4,0 \pm 0,01$ против $1,8 \pm 0,02$; $p < 0,001$) по сравнению с контролем. Аналогичные данные получены на мышах линии ♂ ДВА/2. ПА холангиоцитов при сроке описторхозной инвазии 4 месяца -превышала контроль на 50,0% (МИ $5,0 \pm 0,01$ против $2,5 \pm 0,01$; $p < 0,001$).

Что касается гепатоцитов, то их ПА в различных частях печеночных долек при указанном выше сроке паразитарной инвазии не одинакова. Исследования, выполненные на ♂ ДВА/2 с 4-х месячной описторхозной инвазией, показали, что в центральной части печеночной дольки ИМЯ (индекс меченных ядер) по сравнению с контролем снижен на 33,8% ($52,6 \pm 0,8$ против $79,4 \pm 1,1$; $p < 0,001$), тогда как в середине печеночной дольки этот показатель превышает контроль на 48,3% ($95,8 \pm 0,7$ против $64,6 \pm 0,7$; $p < 0,001$). На периферии же печеночной дольки уровень ИМЯ также достоверно превалирует по сравнению с группой контроля на 10,7% ($62,3 \pm 0,8$ против $56,6 \pm 0,7$; $p < 0,01$). Вероятно, это различие обусловлено степенью трофического обеспечения в зависимости от локализации клеток в

печеночной дольке. В среднем, ПА гепатоцитов (МИ) у инвазированных описторхами мышей ♂ДВА/2 в течении 4-х месяцев выше контроля на 23,8%.

Кроме того, по сравнению с активацией процессов пролиферации тканей большинства органов инбредных животных на фоне хронической описторхозной инвазии – пролиферативная активность клеток костного мозга постоянно находится в угнетенном состоянии, в среднем, на 15%.

Известно, что возрастание активности пролиферации клеточно-тканевых структур организма создаёт условия для трансформации нормальных клеток в злокачественные. Обязательным условием процесса трансформации клеток и развития карцином/бластом являются мутации генов контроля пролиферации – «генов-супрессоров», обуславливающие неконтролируемое возрастание выработки уровня митогенных факторов [7].

С одной стороны – снижение активности репаративной системы ДНК возможно в случае мутации генов, которые отвечают за функцию указанной системы. С другой стороны – потеря возможности СК восстанавливать собственную структуру ДНК может привести к возникновению мутаций и в онкогенах, и в генах-супрессорах (антионкогенах), функция которых в отношении регуляции клеточной пролиферации (торможения) и дифференцировки утрачивается [7]. Такие СК перестают реагировать на сигналы из окружающей среды, у них возникает ауто- и паракринная стимуляция сигналов пролиферации, происходят торможение процесса апоптоза, в результате – генетическая нестабильность обуславливает их трансформацию [13].

Необходимо отметить, что ускорение процессов пролиферации тканей может быть опосредовано различными факторами. Рядом авторов выявлено множество (в пределах 40) экскреторно-секреторных продуктов гельминта *Opisthorchis felinus* [17], которые обладают свойствами биологического воздействия на ткани организма-хозяина.

Размножение клеток регулируется гомеостатическими механизмами организма на различных уровнях: тканевом (в т. ч. кейлонные эфффекторы), межтканевом (генотропные активаторы) и организменном (нервная, эндокринная и иммунологическая регуляция), которые детерминируют активацию или ингибицию митотического цикла. Получение данных о механизмах действия клеточно-тканевых биорегуляторов является основой для понимания сущности процессов, осуществляющихся в живых системах. Исходя из того, что система регуляция клеточного цикла основана на двух видах сигналов: один из них – о неповреждённости генома, другой – о воздействии внешних стимулирующих или ингибирующих митоз факторов [19], то в тканевой регуляции процесса пролиферации и поддержания структурного гомеостаза на клеточно-тканевом уровне значимую роль играет синтез дифференцированными клетками ткани кейлон-содержащего фактора [12; 18; 19].

Кейлоны угнетают пролиферацию незрелых клеток этой же ткани на основе биологического механизма обратной связи: снижение числа дифференцированных клеток в ткани опосредует снижение уровня выработки кейлонов; вследствие снижения содержания указанного тканеспецифического эфффектора возрастает митотическая

активность тканевых клеток [11; 18; 20; 27]. В результате данного механизма поддерживается необходимое количество клеток в тканях. Отсюда следует, что изучение механизма регуляции тканевого гомеостаза при описторхозной инвазии организма кейлон-содержащим фактором имеет большое значение для определения роли его в промоции холангиоканцеогенеза [22].

В связи с тем, что у инбредных мышей не представляется возможным выделение тканей, выстилающих желчные протоки, и получение из них кейлон-содержащего экстракта, то для изучения и понимания закономерностей гомеостатического механизма тканевой регуляции пролиферации холангиоцитов при инвазии организма описторхами существенными являются данные, полученные на модели гепатоцеллюлярной ткани.

При исследовании кейлонной активности экстракта из ткани печени неинвазированных описторхами инбредных мышей установлено достоверное снижение пролиферации гепатоцитов в опытной группе на 60,1 % ($251,5 \pm 70,3$ имп. /100 сек. против $630,9 \pm 93,3$ имп. /100 сек. в контроле, $p < 0,05$). В качестве тест-объекта на тканеспецифичность кейлонного экстракта из ткани печени были использованы почки. Митотическая активность клеток данного органа в контрольной и опытной группах статистически недостоверна ($p > 0,05$). Таким образом, выделенный экстракт из ткани неинвазированной трематодой *Opisthorchis felineus* печени обладает выраженной тканеспецифической кейлонной активностью и может быть использован для выполнения экспериментальных исследований.

Результаты изучения чувствительности гепатоцитов при описторхозной инвазии длительностью 2 месяца (♂ СВА/Лас) к кейлонному фактору, выделенному из ткани здоровой печени (вводился в/б в дозе 10 мг на мышь), показали разницу с неинвазированными животными. У мышей с описторхозной инвазией синтез ДНК в гепатоцитах ингибируется КФ на 20,0% ($249,8$ имп/мин: -КФ против $200,4$ имп/мин: +КФ), а в контрольной группе (животные не инвазированы) чувствительность гепатоцитов к КФ несколько выше – ингибция пролиферативной активности составила 27,8% ($643,8$ имп/мин: -КФ против $464,6$ имп/мин: +КФ). Полученные данные свидетельствуют о том, что гепатоциты не инвазированных гельминтами животных к действию ингибитора пролиферации, выделенного из ткани здоровой печени, чувствительны в большей степени чем гепатоциты животных, инвазированные трематодами в течение 2-х месяцев (ниже на 7,8%).

Биологическая активность КФ, выделенного из печени мышей при вышеуказанном сроке описторхозной инвазии, имеет аналогичную чувствительности гепатоцитов к КФ тенденцию. При воздействии кейлон-содержащего экстракта, полученного из печени мышей с 2-х месячной описторхозной инвазией, отмечается меньший процент торможения пролиферации ($609,8$ имп/мин) – 66,8%, чем при воздействии КФ, выделенного из печени не инвазированных животных ($387,5$ имп/мин) – 78,9% по отношению к контролю ($1836,2$ имп/мин). На основании полученных данных можно сделать вывод, что 2-х месячная

описторхозная инвазия влияет на активность кейлон-содержащего экстракта печени. У практически здоровых животных КФ более выраженно тормозит пролиферацию клеток ткани, чем у инвазированных (ниже на 12,1%).

Практически, снижение показателя уровня чувствительности гепатоцитов к кейлонному фактору при описторхозной инвазии (7,8%) и биологической активности КФ, выделенного из печени мышей, инвазированных описторхами (на 12,1%) – имеют одну и ту же тенденцию.

Таким образом, результаты исследования показали, что при длительной описторхозной инвазии активация пролиферации тканей организма ассоциируется с нарушением механизмов её регуляции – снижением активности мембранотропного гомеостатического фактора (биорегулятора), ингибирующего пролиферацию (кейлоны, КФ) и чувствительности к нему рецепторов соматических клеток.

Отклонение от нормы механизмов регуляции клеточно-тканевого гомеостаза, индуцированное инвазией биотического патогена *Opisthorchis felineus* – опосредует существенное снижение функций сбалансированного управления митотическим циклом и процессом дифференцировки клеток. Это является фактором, детерминирующим возникновение и развитие процесса онкогенеза [29].

Полученные результаты экспериментальных исследований активности кейлон-содержащего экстракта и чувствительности к нему соматических клеток при описторхозе на модели печени инбредных мышей дают основание полагать об аналогичных нарушениях регуляции пролиферации клеток других тканей, в том числе протокового эпителия. То есть, нарушение механизма биологического действия антипролиферативных сигналов кейлонн-содержащего фактора через трансмембранные рецепторы СК приводит к размножению клеток, нечувствительных к подавляющим рост факторам, что является возможным промотором холангиоканцерогенеза.

Изменение концентрации или активности КФ вслед за канцерогенным воздействием каких-либо веществ выявлено многими авторами, а на стадии формирования опухолевых узелков этот механизм нарушен [20; 28; 29]. Возможно, в снижении чувствительности рецепторов соматических клеток к КФ играет роль активация ПОЛ цитомембран и их дестабилизация [22].

Нарушение регуляции тканевого гомеостаза организма при инвазии гепатобилиарной системы мышей трематодой *Opisthorchis felineus* в сторону активации процессов пролиферации подтверждается и следующими данными. Показано, что скорость роста сингенных злокачественных опухолей (ЗО) при ХО относительно ГС значительно возрастает: инвазия 1 месяц, ♂ F1 [СВА/Лас х С57В1/6], ЗО РШМ-5 – на 33,3% ($p<0,05$); инвазия 4,5 месяца, ♀ СВА/Лас, ЗО РШМ-5 - на 29,7% ($p<0,05$); инвазия 4 месяца, ♀ Balb/c, ЗО АКТОЛ – на 650,0% ($p<0,001$). Полученные результаты исследования являются значимыми для оценки роли нарушения регуляции тканевого гомеостаза организма на фоне описторхозной инвазии в детерминации процесса холангиоканцерогенеза.

Кроме того, необходимо отметить, что при тканевом стрессе в регуляции клеточно-тканевого гомеостаза (процессы пролиферации и дифференцировки клеток) участвует система интерферонов (ИФН), которую образуют гены, рецепторы и эффекторные молекулы [10; 25; 30]. Из всех видов ИФН одним из наиболее значимых для гомеостаза организма и фармакологии является лейкоцитарный интерферон (L-ИФН/ ИФН- α), содержание которого составляет 95,0% от всех молекул интерферона [4; 6]. L-ИФН свободно циркулирует в крови и быстро распространяется по органам и тканям. Взаимодействие L-ИФН с клетками ткани реализуется через специфические мембранные рецепторы, ферментативные системы [37; 38], обеспечивающие передачу сигналов в клеточное ядро для реализации биологических эффектов [32; 33].

Среди 300 эффектов системы интерферонов L-ИФН – кроме антивирусного, антимикробного, иммуномодулирующего и других – обладает антипролиферативным и антитуморогенным действием [6]. В настоящее время при опухолях различной гистологической структуры и локализации с целью профилактики опухолевой прогрессии, рецидивов и метастазов применяют препараты на основе L-ИФН. Систему интерферонов относят к ингибирующему регулятору практически всех звеньев онкогенеза: инициации, пролиферации, прогрессии и метастазирования [2; 5; 14; 31]. Эффект торможения процессов пролиферации данным цитокином охватывает все клетки организма, однако максимальная чувствительность наблюдается у быстроразмножающихся клеток [16]. Также известно, что L-ИФН может ингибировать в опухолевых клетках определённые онкогены (с-мус, с-src, сHa-ras) и индуцировать активацию других участков генома, которые способны обеспечить проапоптотическую активность [15]. Существенным эффектом L-ИФН является способность в недифференцированных опухолевых клетках индуцировать процессы созревания при ингибции процессов их пролиферации [16; 23].

Ранее нами на инбредных мышах-опухоленосителях ♀ СВА/Лас с инокуляцией сингенной опухоли РШМ-5 подкожно ($0.5 \text{ мл/} 1 \times 10^6 \text{ клеток}$), инвазированных биотическим патогеном *Opisthorchis felinus* в течение 4,5 мес. было показано (Рыбка А.Г., Шайн А.А., ж. «Цитокины и воспаление», 2002), что при внутрибрюшинном введении им ростингибирующего фактора трансформированных клеток (L-ИФН) в дозе $5 \times 10^3 \text{ Ед.}$ в течение 20 дней наблюдается возрастание скорости роста указанной опухоли на 104,0 % (2 гр.) по сравнению с инвазированными мышами-опухоленосителями (1 гр.) и на 133,7 % превысила этот показатель в группе (3 гр.) неинвазированных животных-опухоносителей.

Необходимо обратить внимание на тот факт, что при внутрибрюшинном введении гомологичного лейкоцитарного L-ИФН в указанных дозе и периоде инбредным мышам-неопухоленосителям ♂ ДВА/2 и ♀ СВА/Лас со сроком описторхозной инвазии 4 мес. – МИ эпителия внутрипеченочных протоков достоверно снижался на 20,0% и 55,5% соответственно. Т. е. исследуемый ростингибирующий цитокин L-ИФН в определённой степени конкурирует с ростовыми факторами описторхов.

Данные литературы показывают, что в неинвазированных описторхами организмах L-ИФН ингибирует процесс ПА во всех тканях, в том числе эффективно в карциномах [16; 23]. Природа механизмов стимулирования роста клеток опухолевой ткани при введении в организм ИФН остается неясной. Однако известно, что в опухолевых клетках имеются дефекты в регуляторной цепи пролиферации. При канцерогенезе происходит гиперэкспрессия клеточных рецепторов, обладающих тирозинкиназной активностью к факторам роста (ФР), т.е. нарушается регуляция поверхностных клеточных рецепторов и значительно возрастает трансдукция митогенных сигналов внутрь клетки. Возможно, значительная самообеспеченность злокачественной опухоли сигналами роста (митогенными сигналами) на фоне высокого уровня циркулирующих в среде организма факторов роста гельминтов с учетом гиперэкспрессии тропных к ним мембранных рецепторов детерминирует определённые особенности биологического действия ингибитора пролиферации соматических и злокачественных клеток L-ИФН. Возможно, ростовые факторы, выделяемые описторхами и опухолевой тканью, синергично конкурируют с L-ИФН, превалируя в биологическом действии на ткани – активируют пролиферативные процессы в карциномах. В отсутствии же у инвазированных описторхами мышей злокачественных опухолей гомологичный L-ИФН оказывает определённый рост-ингибирующий эффект на СК.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при наличии в организме злокачественной опухоли на фоне длительной описторхозной инвазии модифицируется эффект ингибитора злокачественного роста – гомологичного лейкоцитарного интерферона (L-ИФН), в стимулятора [21].

Модификация антитуморогенного эффекта L-ИФН под воздействием выделяемых в среду организма метаболитов описторхов (факторов роста) и факторов роста карцином в сторону активации злокачественного процесса возможна только на уровне регуляции функции клеточного генома.

Выводы. 1. Длительное паразитирование в гепатобилиарной системе организма экзопатогенного гельминта *Opisthorchis felinus* опосредует нарушение механизмов регуляции клеточно-тканевого гомеостаза в сторону снижения биологической функции ростиингибирующего тканеспецифического кейлон-содержащего фактора, т. е. снижения контроля над митотическим циклом СК. Это обуславливает высокую пролиферативную активность холангиоцитов и других СК организма.

2. Нарушение механизмов регуляции клеточно-тканевого гомеостаза организма подтверждается явлением модификации биологического действия гомологичного лейкоцитарного интерферона у инбредных мышей-опухоленосителей с хроническим описторхозом - из ингибитора канцерогенеза в активатора. Установленная закономерность предполагает исключение применения L-ИФН (ИФН-α) у больных ХО со злокачественными процессами.

3. Снижение активности рост-ингибирующего тканеспецифического кейлон-содержащего фактора и чувствительности к нему соматических клеток на фоне хронической инвазии организма гельминтом *Opisthorchis felinus* при воздействии на ткани протокового эпителия мутагенов/канцерогенов играет роль промотора злокачественных опухолей, в том числе холангиоканцерогенеза.

4. Одной из задач вторичной профилактики холангиоканцерогенеза в постгельминтный период является разработка биотехнологических методов, восстанавливающих системы регуляции клеточно-тканевого гомеостаза организма, т. е. управление митотическим циклом и процессом дифференцировки соматических клеток.

Литература

1. Богданов А.О., Прокудина Д. В., Байков А. Н., Салтыкова И. В. Молекулярные механизмы, опосредующие развитие холангиокарциномы в ходе хронической инвазии печёночными сосальщиками // Сибирский онкологический журнал. 2015. № 6. С. 83-90.
2. Брюзгин В.В., Платинский Л.В. Роль цитокинов в химиотерапии злокачественных опухолей: практика применения цитокиновых препаратов Рефнот® и Ингарон® при распространенных опухолевых процессах с множественными метастазами // Современная онкология. 2014. № 1. С. 2-7.
3. Бычков В.Г., Хадиева Е.Д., Зуевский В.П., Лазарев С.Д., Барышников А.П., Симонов А.В., Лукманов И.Р., Урузбаев Р.М., Золотухина Е.В., Шидин В.А. Закономерности канцерогенеза на фоне суперинвазионного описторхоза // Тюменский медицинский журнал. 2015. № 17(3). С. 11-13.
4. Волкова, М.А. Интерфероны и их применение в онкогематологии // Российский биотерапевтический журнал. 2002. Т. 1. № 1. С. 25-33.
5. Воронцова А.Л., Кудрявец Ю.И., Жильчук В.Е., Безденежных Н.А. Экспериментальное и клиническое обоснование применения препаратов интерферона при онкопатологии // Здоровье женщины. 2009. № 7(43). С. 224-228.
6. Ершов Ф.И., Наровлянский А.Н. Основные итоги изучения системы интерферона к 2011 году // Интерферон-2011: Сборник научных статей. М., 2012. С. 14-34.
7. Залетаев Д.В. и др. Функциональный анализ опухолевых геномов и разработка тест-систем для ранней диагностики, прогноза течения и оптимизации терапии злокачественных новообразований // Вестник РАМН. 2013. Т. 68. № 9. С. 7-14.
8. Иванских В.И., Близнюк В.В. Влияние описторхисов на проявление вирусов герпеса второго типа в эксперименте и их возможное участие в механизме возникновения первичного рака печени // Медицинская паразитология. 1996. № 2. С. 23-26.
9. Кавецкий Р.Е. Взаимодействие организма и опухоли. Киев: Наукова думка, 1977. Т. 235. С. 2004.
10. Караулов А.В. Растворимые изоформы рецептора интерферона I типа и антиинтерфероновые антитела как регуляторы действия экзогенного и эндогенного интерферона // Иммунология. 2007. № 4. С. 240-243.

11. Кетлинский С.А. и др. Кейлоны и регуляция деления клеток. М.: Медицина, 1984.
12. Кокорина Н.В., Морозик М.С., Малиновская Ю.В. Механизмы клеточной дифференцировки. Минск: ИВЦ Минфин, 2017. 92 с.
13. Копнин. Б.П. Нестабильность генома и онкогенез // Молекулярная биология. 2007. Т. 41. № 2. С. 369-380
14. Кособокова Е., Косорукова В. Интерфероны в онкологии // Врач. 2010. № 11. С. 18-21.
15. Лисяный Н.И., Семенова В.М., Любич Л.Д. Достижения и проблемы применения интерферонов в нейроонкологии //Ukrainian Neurosurgical Journal. 2004. №. 3. С. 29-36.
16. Литвицкий П.Ф., Синельникова Т.Г. Врожденный иммунитет: механизмы реализации и патологические синдромы // Вопросы современной педиатрии. 2009. Т. 8. № 1. С. 59-61.
17. Львова М.Н., Дужак Т.Г., Центалович Ю.П. и др. Секретом мариты печеночного сосальщика *Opisthorchis felinus* // Паразитология. 2014. Т. 48. № 3. С. 169-184.
18. Мамедов М.К. Роль кейлонной концепции в развитии взглядов на механизмы регуляции клеточного деления // Биомедицина. 2006. № 4, С. 36-39.
19. Мельникова В.М. Влияние белков кейлонов в норме и при злокачественном перерождении // Актуальные проблемы современной медицины и фармации: Мат-лы 72 научно-практической конференции студентов и молодых учёных с международным участием (18–20 апреля 2018). Минск: БГМУ, 2018. С. 655.
20. Окулов В.Б. Кейлоны и опухолевый рост // Вопросы онкологии. 1981. Т. 27. № 4. С. 101-114.
21. Рыбка А. Г. К вопросу о влиянии биотического фактора – инвазии трематоды *Opisthorchis felinus* на состояние иммунного статуса организма и пролиферативную активность соматических клеток // Инфекция и иммунитет. 2016. Т. 6. № 3. С. 232-236. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-2016-3-232-236>
22. Рыбка А.Г. Дисбаланс иммунобиологической реактивности организма, инфекция и факторы мутагенеза в гепатобилиарной системе при воздействии природно-очагового фактора среды обитания — инвазии трематоды *Opisthorchis felinus* // Инфекция и иммунитет. 2022. Т. 12. № 1. С. 172-178. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-IIR-1737>
23. Телетаева Г.М. Цитокины и противоопухолевый иммунитет // Практическая онкология. 2007. Т. С. 211-218.
24. Федорова О.С., Ковширина Ю.В., Ковширина А.Е., Федотова М.М. и др. Анализ заболеваемости инвазией *Opisthorchis felinus* и злокачественными новообразованиями гепатобилиарной системы в Российской Федерации // Бюллетень сибирской медицины. 2016. № 15(5). С. 147-158.
25. Хаитов, Р.М., Игнатьева Г.А., Сидорович И.Г. Иммунология. Норма и патология. М: Медицина, 2010. 752 с.
26. Шайн А.А., Шаназаров Н.А., Бабинов Б.Н., Федоров Н.М. и др. Кафедра онкологии Тюменской ГМА. Сорок лет научно-исследовательской и педагогической работы // Тюменский медицинский журнал. 2010. № 2. С. 8-11.

27. Элкибадзе Г.М., Элкибадзе А.Г. Общие принципы авторегулирования роста ткани во взрослом организме II. Концепция адаптационного механизма контроля массы ткани // Вестник РАЕН. 2006. № 2. С. 32-40.
28. Barbason H., Smoliar V. Activite mitotique lors de la periode preneoplasique precedant la cancerisation du foie par la diethylnitrosamine // Jn. Experiential. 1976. 32(1). Pp. 106-108.
29. Dexter T.M., White H. Growth without inflation. Nature, 1990. Vol. 24. Pp. 380-381.
30. Donnelly R.P. Interferon-lambda: a new addition to an old family J Interferon. Cytokine Res. 2010. Vol. 30(8). Pp. 555-564.
31. Lamm D. Interferon alfa in the treatment paradigm for non-muscle-invasive bladder cancer // Urol. Oncol. 2014. Vol. 2(1). Pp. 21-30.
32. Randall R.E. Interferons and viruses: an interplay between induction, signalling, antiviral responses and virus countermeasures // J. Gen. Virol. 2008. Vol. 89. Pp. 1-47.
33. Sen G.C. The interferon-stimulated genes: targets of direct signaling by interferons, double-stranded RNA and viruses // Curr. Top. Microbiol. Immunol. 2007. Vol. 3(16). P. 233-250.
34. Smout M.J., Sripa B., Laha T. et al. Infection with the carcinogenic human liver fluke, *Opisthorchis viverrini* // Mol. Biosyst. 2011; 7 (5): 1367-1375. <https://doi.org/10.1039/c0mb00295j>
35. Sripa B., Brindley P.J., Mulvanna J. et al. The tumorigenic liver fluke *Opisthorchis viverrini* - multiple pathways to cancer // Trends in Parasitology. 2012. 28(10). Pp. 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2012.07.006>
36. Takaoka A., Yanai H. Interferon signalling network in innate defence // Cellular microbiology. 2006. Vol. 8. Pp. 907-922.
37. Thamavit W., Ngamyang M., Boonpucknavig V., Boonpucknavig S., Moore M.A. Enhancement of DEN-induced hepatocellular nodule development by *Opisthorchis viverrini* infection in Syrian golden hamsters. // Carcinogenesis. 1987. 8(9). Pp. 1351-1353. <https://doi.org/10.1093/carcin/8.9.1351>
38. Vila-del Sol V., D'áz-Munoz M., Fresno M. Requirement of tumor necrosis factor α and nuclear factor- κ B in the induction by IFN- γ of inducible nitric oxide synthase in macrophages // J. Leuk. Biol. 2007. Vol. 81. Pp. 272-283.

References

1. Bogdanov, A.O., Prokudina, D.V., Baikov, A.N., & Saltykova, I.V. (2015). Saltykova I. V. Molekulyarnye mexanizmy, oposreduyushhie razvitie xolangiokarcinomy v xode xronicheskoy invazii pechyonochnyimi sosal'shnikami. *Sibirskij onkologicheskij zhurnal*, 6, 83-9. (in Russ.).
2. Bryuzgin, V.V., & Platinsky, L.V. (2014). Rol' citokinov v ximioterapii zlokachestvennyx opuxoley: praktika primeneniya citokinovyx preparatov Refnot® i Ingaron® pri rasprostranennyx opuxoleyx processax s mnozhestvennyimi metastazami. *Sovremennaya onkologiya*, 1, 2-7. (in Russ.).
3. Bychkov, V.G., Khadieva, E.D., Zuevsky, V.P., Lazarev, S.D., Baryshnikov, A.P., Simonov, A.V., Lukmanov, I.R., Uruzbaev, R.M., Zolotukhina, E.V., & Shidin, V.A. (2011). Zakonomernosti kancerogeneza na fone superinvazionnogo opistorxoza. *Tyumenskij medicinskij zhurnal*, 7(3), 11-13. (in Russ.).

4. Volkova, M.A. (2002). Interferony` i ix primeneniye v onkogematologii. *Rossiyskiy bioterapevticheskiy zhurnal*, 1(1), 25-33. (in Russ.).
5. Vorontsova, A.L., Kudryavets, Y.I., Zhilchuk, V.E., & Bezdenzhnykh, N.A. (2009). E`ksperimental`noe i klinicheskoe obosnovaniye primeneniya preparatov interferona pri onkopatologii. *Zdorov`e zhenshhiny`*, 7(43), 224-228. (in Russ.).
6. Ershov, F.I., & Narovlyansky, A.N. (2012). Osnovny`e itogi izucheniya sistemy` interferona k 2011 godu. In *Interferon-2011: Sbornik nauchny`x statej* (pp. 14-34). Moscow. (in Russ.).
7. Zaletaev, D.V. (2013). Funkcional`ny`j analiz opuxolevy`x genomov i razrabotka test-sistem dlya rannej diagnostiki, prognoza techeniya i optimizacii terapii zlokachestvenny`x nooobrazovaniy. *Vestnik RAMN*, 9, 7-14. (in Russ.).
8. Ivanskikh, V.I., & Bliznyuk, V.V. (1996). Vliyanie opistorxisov na proyavleniye virusov gerpesa vtorogo tipa v e`ksperimente i ix vozmozhnoe uchastie v mexanizme vozniknoveniya pervichnogo raka pecheni. *Medicinskaya parazitologiya*, 2, 23-26. (in Russ.).
9. Kavetsky, R.E. (1977). *Vzaimodejstvie organizma i opuxoli*. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.).
10. Karaulov, A.V. (2007). Rastvorimy`e izoformy` receptora interferona I tipa i antiinterferonovy`e antitela kak regulatory` dejstviya e`kzogenного i e`ndogenного interferona. *Immunologiya*, 4, 240-243. (in Russ.).
11. Ketlinsky, S.A. i dr. (1984). *Kejlony` i regulyaciya deleniya kletok*. M.: Medicina. (in Russ.).
12. Kokorina, N.V., Morozik, M.S., & Malinovskaya, Y.V. (2017). i dr. *Kejlony` i regulyaciya deleniya kletok*. M.: Medicina Minsk: IVC Minfin. (in Russ.).
13. Kopnin, P. (2007). Nestabil`nost` genoma i onkogenez. *Molekulyarnaya biologiya*, 41(2), 369-380. (in Russ.).
14. Kosobokova, E., & Kosorukova, V. (2010). Interferony` v onkologii. *Vrach*, 11, 18-21. (in Russ.).
15. Lisyanyi, N.I., Semenova, V.M., & Lubich, C.D. (2004). Dostizheniya i problemy` primeneniya interferonov v nejroonkologii. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 3, 29-36. (in Russ.).
16. Litvitsky, P.F., & Sinelnikova, T.G. (2009). Vrozhdenny`j immunitet: mexanizmy` realizacii i patologicheskie sindromy`. *Voprosy` sovremennoj pediatrii*, 8(1), 59-61. (in Russ.).
17. Lvova, M.N., Duzhak, T.G., & Tsentalovich, J.P. i dr. Sekretom marity` pechenochnogo sosal`shhika *Opisthorchis felineus*. *Parazitologiya*, 48(3), 169-184. (in Russ.).
18. Mamedov, M.K. (2006). Rol` kejlonoj koncepcii v razvitii vzglyadov na mexanizmy` regulyacii kletochного deleniya. *Biomedicina*, 4, 36-39. (in Russ.).
19. Melnikova, V.M. (2018). Vliyanie belkov kejlonoj v norme i pri zlokachestvennom pererozhdenii. *Aktual`ny`e problemy` sovremennoj mediciny` i farmacii: Mat-ly` 72 nauchno-prakticheskaya konferenciya studentov i molody`x uchyony`x s mezhdunarodny`m uchastiem (18–20 aprelya 2018)*, Minsk: BGMU. (in Russ.).
20. Okulov, V.B. (1981). Kejlony` i opuxolevy`j rost. *Voprosy` onkologii*, 27(4), 101-114. (in Russ.).

21. Ry`bka, A.G. (2016). K voprosu o vliyaniy bioticheskogo faktora – invazii trematody` Opisthorchis felinus na sostoyanie immunnogo statusa organizma i proliferativnyuyu aktivnost` somaticheskikh kletok. *Infekciya i immunitet*, 6(3), 232-236. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-2016-3-232-236> (in Russ.).
22. Ry`bka, A.G. (2022). Disbalans immunobiologicheskoy reaktivnosti organizma, infekciya i faktory` mutageneza v gepatobiliarnoy sisteme pri vozdeystvii prirodno-ochagovogo faktora sredi` obitaniya — invazii trematody` Opisthorchis felinus. *Infekciya i immunitet*, 12 (1), 172-178. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-IIR-1737>. (in Russ.).
23. Teletaeva, G.M. (2007). Citokiny` i protivopuxolevyj` immunitet. *Prakticheskaya onkologiya*, 8(4), 211-218. (in Russ.).
24. Fedorova, O.S., Kovshirina Yu.V., Kovshirina, A.E., & Fedotova, M.M. i dr. (2016). Analiz zabolevaemosti invaziej Opisthorchis felinus i zlokachestvenny`mi novoobrazovaniyami gepatobiliarnoy sistemy` v Rossijskoj Federacii. *Byulleten` sibirskoj mediciny`*, 15(5), 147-158. (in Russ.).
25. Khaitov, R.M., Ignatieva, G.A., & Sidorovich, I.G. (2010). *Immunologiya. Norma i patologiya*. M: Medicina. (in Russ.).
26. Shajn, A.A., Shanazarov, N.A., Babinov, B.N., & Fedorov, N.M. i dr. (2010). Sorok let nauchno-issledovatel`skoj i pedagogicheskoy raboty`. *Tyumenskij medicinskij zhurnal*, 2, 8-11. (in Russ.).
27. Elkibadze, G.M., & Elkibadze, A.G. (2006). Obshhie principy` avtoregulirovaniya rosta tkani vo vzrosлом organizme II. Koncepciya adaptacionnogo mexanizma kontrolya massy` tkani. *Vestnik RAEN*, 2, 32-40. (in Russ.).
28. Barbason, H., & Smoliar, V. (1976). Activite mitotique lors de la periode preneoplasique precedent la cancerisation du foie par la diethylnitrosamine. *Jn. Experientia*, 32(1), 106-108.
29. Dexter, T.M., & White, H. (1990). Growth without inflation. *Nature*, Vol. 24, 380-381
30. Donnelly, R.P. (2010). Interferon-lambda: a new addition to an old family J Interferon. *Cytokine*, Vol. 30(8), 555-564.
31. Lamm, D. (2014). Interferon alfa in the treatment paradigm for non-muscle-invasive bladder cancer. *Urol. Oncol*, 2(1), 21-30.
32. Randall, R.E. (2008). Interferons and viruses: an interplay between induction, signalling, antiviral responses and virus countermeasures. *J. Gen. Virol*, 89, 1-47.
33. Sen, G.C. (2007). The interferon-stimulated genes: targets of direct signaling by interferons, double-stranded RNA and viruses. *Curr. Top.Microbiol. Immunol*, 3(16), 233-250.
34. Smout, M.J., Sripa, B., & Laha, T. et al. (2011). Infection with the carcinogenic human liver fluke, Opisthorchis viverrine. *Mol. Biosyst*, 7 (5), 1367-1375. <https://doi.org/10.1039/c0mb00295j>
35. Sripa, B., Brindley, P. J., & Mulvenna, J. et al. (2012). The tumorigenic liver fluke Opisthorchis viverrini – multiple pathways to cancer. *Trends in Parasitology*, 28(10), 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2012.07.006>.
36. Takaoka, A., & Yanai, H. (2006). Interferon signalling network in innate defence. *Cellular microbiology*, 8, 907-922.

37. Thamavit, W., Ngamyang, M., Boonpucknavig, V., Boonpucknavig, S., & Moore, M.A. (1987). Enhancement of DEN-induced hepatocellular nodule development by *Opisthorchis viverrini* infection in Syrian golden hamsters. *Carcinogenesis*, 8(9), 1351-1353. <https://doi.org/10.1093/carcin/8.9.1351>

38. Vila-del Sol, V., Díaz-Munoz, M., & Fresno, M. (2007). Requirement of tumor necrosis factor α and nuclear factor-kB in the induction by IFN- γ of inducible nitric oxide synthase in macrophages. *J. Leuk. Biol*, 8, 272-283.

дата поступления: 31.05.2023

дата принятия: 30.11.2023

   Рыбка А.Г., 2024

УДК: 57.088.1

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/07>

Филиппова А.В., Рябухина М.В., Одинокоев Г.Н., Карпова Н.Г.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ
ЭКСТРАКЦИИ ДНК ИЗ ТКАНЕЙ ЖИВОТНЫХ

A.V. Filippova, M.V. Ryabukhina, G.N. Odinkov, N.G. Karpova

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY
OF METHODS FOR DNA EXTRACTION FROM ANIMAL TISSUES

Аннотация. Впервые проведен сравнительный анализ эффективности методов экстракции ДНК, применяемых в экспертно-криминалистической практике, из различных тканей животных – костных рогов и копыт северного оленя *Rangifer tarandus* (Linnaeus, 1758); скелетных мышц, хрящевой ткани и слизи радужной форели *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792); скелетных мышц и ребра домашней свиньи *Sus scrofa domestica* (Erxleben, 1777). Выделение ДНК проводили согласно протоколам производителей с помощью шести коммерческих наборов реагентов, отечественного производства, основанных на методе осаждения спиртом: «GM Tissue» («Raissol»), «Amex» («Raissol»); сорбции на магнитные частицы: «GM Tissue M» («Raissol»), «М-Сорб-кость» («Синтол»); сорбции на силикагель: «D-Tissues» («Биолабмикс»), «D-blood» («Биолабмикс»). Количественные и качественные характеристики полученной ДНК оценивали измерением концентрации двухцепочечной ДНК на флуориметре Qubit 2.0 (Life Technologies, США), используя набор реагентов Qubit DNA HS Assay Kit. Наибольшая концентрация двухцепочечной ДНК, из всех типов тканей животных, была получена методом сорбции на магнитные частицы. С применением этого метода, были получены наиболее стабильные и воспроизводимые концентрации ДНК (средние значения – 474,00 мкг/мл, 268,00 мкг/мл, 83,20 мкг/мл и 69,70 мкг/мл, соответственно). С применением метода экстракции ДНК на основе осаждения спиртом, из всех типов тканей животных, были получены более низкие концентрации ДНК, в сравнении с методом сорбции на магнитные частицы. Однако применение данного метода показало достаточно высокую стабильность и воспроизводимость получаемых концентраций ДНК (средние значения – 120,00 мкг/мл, 110,00 мкг/мл и 99,90 мкг/мл, соответственно), из всех типов биологических тканей, во всех сериях (повторениях) этапа экстракции. Применение метода экстракции ДНК на основе сорбции на

Annotation. For the first time, a comparative analysis of the effectiveness of DNA extraction methods used in expert forensic practice from various animal tissues – bone antlers and hooves of reindeer *Rangifer tarandus* (Linnaeus, 1758); skeletal muscle, cartilage tissue and mucus of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792); skeletal muscles and ribs of the domestic pig *Sus scrofa domestica* (Erxleben, 1777). DNA extraction was carried out according to the manufacturers' protocols using six commercial reagent kits, domestically produced, based on the alcohol precipitation method: "GM Tissue" (Raissol), "Amex" (Raissol); sorption onto magnetic particles: "GM Tissue M" ("Raissol"), "M-Sorb-bone" ("Synthol"); sorption on silica gel: "D-Tissues" ("Biolabmix"), "D-blood" ("Biolabmix"). The quantitative and qualitative characteristics of the obtained DNA were assessed by measuring the concentration of double-stranded DNA on a Qubit 2.0 fluorometer (Life Technologies, USA) using the Qubit DNA HS Assay Kit. The highest concentration of double-stranded DNA of all types of animal tissue was obtained by sorption onto magnetic particles. Using this method, the most stable and reproducible DNA concentrations were obtained (average values – 474.00 µg/ml, 268.00 µg/ml, 83.20 µg/ml and 69.70 µg/ml, respectively). Using the method of DNA extraction based on precipitation with alcohol, lower concentrations of DNA were obtained from all types of animal tissues in comparison with the method of sorption onto magnetic particles. However, the use of this method has shown a fairly high stability and reproducibility of the obtained DNA concentrations (average values – 120.00 µg/ml, 110.00 µg/ml and 99.90 µg/ml, respectively), from all types of biological tissues, in all series (repetitions) of the extraction step. The use of a DNA extraction method based on sorption on silica gel showed, on average, lower

силикагель, показало в среднем более низкие концентрации целевой ДНК, из всех типов тканей животных, в сравнении с методами сорбции на магнитные частицы и осаждения спиртом. Данный метод отличался наиболее низкой стабильностью и воспроизводимостью получаемых концентраций ДНК (средние значения – 74,10 мкг/мл и 41,60 мкг/мл, соответственно). Таким образом, авторским коллективом проведена оценка эффективности методических подходов экстракции ДНК, относительно различных типов тканей животных, а также оценка стабильности и воспроизводимости полученных результатов. Ранее эффективность данных методических подходов не оценивалась.

Ключевые слова: экстракция ДНК; ткани животных; силикагель; магнитные частицы; осаждение спиртом; экспертно-криминалистическая практика.

Сведения об авторах: Филиппова Ася Вячеславовна, ORCID:0000-0003-2665-5673, д-р биол. наук, Оренбургский государственный аграрный университет, г. Оренбург, Россия, kassio-67@yandex.ru; Рябухина Мария Владимировна, ORCID: 0000-0002-8409-6630, канд. биол. наук, Экспертно-криминалистический центр МВД России, г. Москва, Россия, marija-rjabuhina@mail.ru; Одинокоев Георгий Николаевич, ORCID: 0009-0000-1074-9291, канд. биол. наук, Экспертно-криминалистический центр МВД России, г. Москва, Россия; Карпова Наталья Григорьевна, Оренбургский государственный аграрный университет, г. Оренбург, Россия, olo-natasha@yandex.ru

concentrations of target DNA from all types of animal tissues, in comparison with the methods of sorption on magnetic particles and precipitation with alcohol. This method was characterized by the lowest stability and reproducibility of the obtained DNA concentrations (average values – 74.10 µg/ml and 41.60 µg/ml, respectively). Thus, the team of authors assessed the effectiveness of methodological approaches to DNA extraction in relation to various types of animal tissue, as well as assessed the stability and reproducibility of the results obtained. The effectiveness of these methodological approaches has not been previously assessed.

Keywords: DNA extraction; animal tissues; silica gel; magnetic particles; alcohol precipitation; forensic practice.

About the authors: Asya V. Filippova, ORCID: 0000-0003-2665-5673, Doctor of Biological Sciences, Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia, kassio@yandex.ru; Maria V. Ryabukhina, ORCID: 0000-0002-8409-6630, Candidate of Biological Sciences, Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia, marija-rjabuhina@mail.ru; Georgy N. Odinokov, ORCID: 0009-0000-1074-9291, Candidate of Biological Sciences, Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia; Natalya G. Karpova, Orenburg State University, Orenburg, Russia, olo-natasha@yandex.ru

Филиппова А.В., Рябухина М.В., Одинокоев Г.Н., Карпова Н.Г. Сравнительный анализ эффективности методов экстракции ДНК из тканей животных // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 76-85. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/07>

Filippova, A.V., Ryabukhina, M.V., Odinokov, G.N., & Karpova, N.G. (2024). Comparative Analysis of the Efficiency of Methods for DNA Extraction from Animal Tissues. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 76-85. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/07>

Введение. Первым этапом любого молекулярно-генетического исследования является выделение (экстракция) ДНК из биологического материала. С момента открытия структуры и свойств ДНК, технология ее выделения непрерывно совершенствуется и модифицируется. При выборе метода экстракции необходимо учитывать предъявляемые к нему требования. Основная задача этапа экстракции – получение высоких концентраций очищенных препаратов ДНК, которые в дальнейшем могут использоваться для решения широкого спектра вопросов. Кроме того, важно учитывать токсичность и быстроту метода, возможность автоматизации процесса. Большинство современных методов выделения ДНК

состоят из следующих этапов: лизис клеточных и ядерных мембран, удаление из полученного материала ингибиторов, инактивация клеточных нуклеаз, отделение искоемых молекул ДНК, их очистка [1; 2; 5; 7; 9; 14; 18-20]. По основным физическим и биохимическим признакам методы экстракции ДНК можно разделить на жидкофазные и твердофазные, среди которых в настоящее время широко используют методы преципитации (осаждение спиртом) и сорбции (на силикагель или магнитные частицы) [8; 11; 15]. Метод преципитации предполагает агрегацию ДНК в присутствии соли и спирта. После осаждения спиртом ДНК отделяется от раствора центрифугированием. Осадок, содержащий ДНК, неоднократно промывается спиртами и концентрируется центрифугированием. Сорбционные методы предполагают наличие твердого носителя с высокой аффинностью к молекулам ДНК, которые с ним обратимо связываются, при этом ингибиторы и другие компоненты остаются в растворе, что позволяет получать высокоочищенные препараты, практически без потерь ДНК [1; 5; 6; 10; 12-14; 16; 17; 19; 20].

Очень часто особенностью криминалистических объектов и следов биологического происхождения, применяемых для проведения ДНК-анализа, является их малое количество и значительное различие в содержании генетического материала, а также наличие гнилостных изменений, ведущих к деградации ДНК и присутствие ингибиторов [2-4].

Учитывая особенности, связанные со сложностью выделения генетического материала из криминалистических объектов и следов биологического происхождения, а также важность их сохранения, выбор метода экстракции ДНК является одним из основополагающих этапов [1; 3].

Цель настоящей работы: оценка эффективности методических подходов, таких как преципитация (осаждение спиртом) и сорбция (на силикагель или магнитные частицы), для экстракции препаратов ДНК из различных типов тканей животных путем определения концентрации целевой ДНК флуориметрическим методом. Нами был проведен сравнительный анализ эффективности экстрагирования ДНК при помощи коммерческих наборов, рекомендуемых производителем для экстракции ДНК в соответствии с определенным типом ткани, а также наборов, не предназначенных (неспецифических) для данных типов тканей.

Объекты, материалы и методы исследования

В работе использованы образцы тканей животных: костные рога и копыта северного оленя *Rangifer tarandus* (Linnaeus, 1758); скелетные мышцы, хрящевая ткань и слизь радужной форели *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792); скелетные мышцы и ребро домашней свиньи *Sus scrofa domesticus* (Erxleben, 1777).

Начальные условия были одинаковыми для всех методов экстракции ДНК, так как выделение проводилось из одних и тех же образцов ткани, разделенных на равные фрагменты весом ~10 мг. Так костные рога северного оленя были разделены на 12 фрагментов, копыта северного оленя – на 12 фрагментов, ребро домашней свиньи – на 9

фрагментов, скелетная мышца домашней свиньи – на 3 фрагмента, скелетная мышца радужной форели – на 9 фрагментов, слизь радужной форели – на 9 фрагментов, хрящевая ткань радужной форели – на 12 фрагментов.

Для экстракции ДНК *методом осаждения спиртом (преципитации)*, в соответствии с протоколами производителя, применяли следующие коммерческие наборы реагентов: «GM Tissue» («Raissol», Россия), рекомендуемый производителем для выделения нуклеиновых кислот из тканей млекопитающих, ворсин хориона, волосных фолликулов и др.; «Amex» («Raissol», Россия), рекомендуемый производителем для выделения нуклеиновых кислот из амниотической жидкости.

Для экстракции ДНК *методом сорбции на магнитные частицы*, в соответствии с протоколами производителей, применяли следующие коммерческие наборы реагентов: «GM Tissue M» («Raissol», Россия), рекомендуемый производителем для выделения нуклеиновых кислот из тканей млекопитающих, ворсин хориона, волосных фолликулов, фиксированных пятен крови; «М-Сорб-кость» («Синтол», Россия), рекомендуемый производителем для выделения нуклеиновых кислот из костного порошка.

Для экстракции ДНК, *методом сорбции на силикагель (производном диоксида кремния)*, в соответствии с протоколами производителей, применяли следующие коммерческие наборы реагентов: «D-Tissues» («Биолабмикс», Россия), рекомендуемый производителем для выделения нуклеиновых кислот из тканей животных; «D-blood», рекомендуемый производителем для выделения геномной ДНК из крови («Биолабмикс», Россия); «РИБО-сорб» («AmpliSens», Россия), рекомендуемый производителем для выделения ДНК/РНК из клинического материала.

Экстракцию ДНК из каждого типа ткани проводили в трех повторах для каждого набора. Определение концентрации ДНК в исследуемых образцах проводили на флуориметре Qubit 2.0 (Life Technologies, США), используя набор реагентов Qubit DNA HS Assay Kit, для количественного определения двухцепочечной ДНК с концентрацией до 100 мкг/мл. Препараты с более высокой концентрацией целевой ДНК подвергались разведению, в соответствии с протоколом производителя. Принцип работы прибора Qubit 2.0 заключается в детекции излучения флуоресцентного красителя, который связывается с двухцепочечной ДНК. Высокая чувствительность метода позволяет определять ДНК в низких концентрациях. Измерение концентраций ДНК производили в соответствии с протоколом производителя. В таблицу вносились среднее значение концентрации ДНК для каждого типа биологических тканей, полученные в серии из трех повторений с наборами реагентов для экстракции.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным результатам, представленным в таблице, выявлены различия в эффективности методов, которые были использованы для экстракции ДНК из различных типов тканей животных.

Так использование коммерческих наборов реагентов «М-Сорб-кость» («Синтол», Россия) и «GM Tissue M» («Raissol», Россия), основанных на методе сорбции на магнитные частицы, позволило стабильно и воспроизводимо получать препараты с высокой концентрацией ДНК из ребра домашней свиньи (среднее значение – 474,00 мкг/мл), костных рогов и копыт северного оленя (средние значения – 268,00 мкг/мл и 83,20 мкг/мл, соответственно), хрящевой ткани радужной форели (среднее значение – 69,70 мкг/мл). Данный метод показал наиболее высокую стабильность и воспроизводимость получаемых концентраций ДНК, во всех сериях (повторениях), после этапа экстракции. Однако набор реагентов «GM Tissue M» («Raissol», Россия), отличался более низкой воспроизводимостью результатов, чем набор «М-Сорб-кость» («Синтол», Россия), и всегда показывал более низкую концентрацию целевой ДНК в препаратах после этапа экстракции.

Таблица

**Сравнительный анализ эффективности методов экстракции
ДНК из тканей животных**

№	Тип ткани (вид)	Метод экстракции ДНК	Коммерческое название набора (производитель)	Концентрация препарата ДНК (мкг/мл), среднее значение (μ)
1, 2, 3	Костные рога северного оленя (<i>Rangifer tarandus</i>)	осаждение спиртом	«GM Tissue» («Raissol», Россия)	~110,00
4, 5, 6		сорбция на магнитные частицы	«GM Tissue M» («Raissol», Россия)	~42,80
7, 8, 9			«М-Сорб-кость» («Синтол», Россия)	~268,00
10, 11, 12		сорбция силикагель	«D-Tissues» («Биолабмикс», Россия)	~2,21
13, 14, 15	Копыта северного оленя (<i>Rangifer tarandus</i>)	осаждение спиртом	«GM Tissue» («Raissol», Россия)	~25,00
16, 17, 18		сорбция на магнитные частицы	«GM Tissue M» («Raissol», Россия)	~72,10
19, 20, 21			«М-Сорб-кость» («Синтол», Россия)	~83,20
22, 23, 24		сорбция на силикагель	«D-Tissues» («Биолабмикс», Россия)	~0,23
25, 26, 27	Ребро домашней свиньи (<i>Sus scrofa domesticus</i>)	осаждение спиртом	«GM Tissue» («Raissol», Россия)	~120,00
28, 29, 30		сорбция на магнитные частицы	«М-Сорб-кость» («Синтол», Россия)	~474,00
31, 32, 33		сорбция на силикагель	«D-Tissues» («Биолабмикс», Россия)	~19,30
34, 35, 36	Скелетная мышца домашней свиньи (<i>Sus scrofa domesticus</i>)	сорбция на силикагель	«РИБО-сорб» («AmpliSens», Россия)	~36,60

37, 38, 39	Скелетная мышца радужной форели (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	осаждение спиртом	«Амех», («Raissol», Россия)	~99,90
40, 41, 42		сорбция на силикагель	«D-blood» («Биолабмикс», Россия)	~42,10
43, 44, 45			«РИБО-сорб» («AmpliSens», Россия)	~74,10
46, 47, 48	Слизь радужной форели (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	осаждение спиртом	«Амех», («Raissol», Россия)	~30,90
49, 50, 51		сорбция на силикагель	«D-blood» («Биолабмикс», Россия)	~3,570
52, 53, 54			«РИБО-сорб» («AmpliSens», Россия)	~41,60
55, 56, 57	Хрящевая ткань радужной форели (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	осаждение спиртом	«GM Tissue» («Raissol», Россия)	~21,40
58, 59, 60		сорбция на магнитные частицы	«М-Сорб-кость» («Синтол», Россия)	~69,70
61, 62, 63			«GM Tissue M» («Raissol», Россия)	~54,60
64, 65, 66		сорбция на силикагель	«D-Tissues» («Биолабмикс», Россия)	~0,16

Применение метода экстракции ДНК на основе осаждения спиртом, с использованием коммерческих наборов реагентов «GM Tissue» («Raissol», Россия) и «Амех», («Raissol», Россия), наиболее эффективно проявило себя при выделении ДНК из ребра домашней свиньи (среднее значение – 120,00 мкг/мл), костных рогов северного оленя (среднее значение – 110 мкг/мл) и скелетной мышцы радужной форели (среднее значение – 99,90 мкг/мл). Данный метод показал достаточно высокую стабильность и воспроизводимость получаемых концентрацией ДНК, во всех сериях (повторениях), после этапа экстракции. Однако концентрация выделенной ДНК в среднем была ниже, чем при использовании метода сорбции на магнитные частицы.

Применение метода экстракции ДНК на основе сорбции на силикагель (производные диоксида кремния), с использованием коммерческих наборов реагентов «D-Tissues» («Биолабмикс», Россия) и «РИБО-сорб» («AmpliSens», Россия), показало в среднем наиболее низкие концентрации целевой ДНК, из всех типов тканей животных, во всех сериях (повторениях), после этапа экстракции. Наиболее эффективным данный метод оказался для экстракции ДНК из скелетной мышцы и слизи радужной форели (среднее значение – 74,10 мкг/мл и 41,60 мкг/мл, соответственно). Тем не менее, полученные с помощью метода сорбции на силикагель результаты, отличались низкой воспроизводимостью, с большим расхождением показателей концентрации целевой ДНК после этапа экстракции. Так минимальные средние значения концентрации целевой ДНК были получены в препаратах из копыт и костных рогов северного оленя (среднее значение

– 0,23 мкг/мл и 2,21 мкг/мл, соответственно), хрящевой ткани радужной форели (среднее значение – 0,16 мкг/мл).

Заключение. Сложность выделения целевой ДНК из тканей животных, состоит в том, что они имеют различный биохимический состав и физические характеристики. Следовательно, весьма проблематично подобрать универсальный протокол для выделения целевой ДНК из всех типов биологических тканей с одинаковой эффективностью.

Проведенный сравнительный анализ концентраций препаратов ДНК, полученных различными методами экстракции, показал, что наибольшая концентрация целевой ДНК, из всех типов тканей животных, была получена методом сорбции на магнитные частицы. Кроме того, с применением этого метода, во всех сериях (повторениях) этапа экстракции, были получены наиболее стабильные и воспроизводимые концентрации целевой ДНК. Следует отметить, что с применением коммерческого набора реагентов на основе сорбции ДНК на магнитные частицы – «М-Сорб-кость» («Синтол», Россия), были получены максимальными концентрациями ДНК, из всех типов биологических тканей, во всех сериях (повторениях) этапа экстракции.

С применением метода экстракции ДНК на основе осаждения спиртом, из всех типов тканей животных, были получены более низкие концентрации целевой ДНК, в сравнении с методом сорбции на магнитные частицы. Однако применение данного метода показало достаточно высокую стабильность и воспроизводимость получаемых концентраций целевой ДНК, из всех типов биологических тканей, во всех сериях (повторениях) этапа экстракции. Наибольшие концентрации целевой ДНК были получены при экстракции из ребра домашней свиньи, костных рогов северного оленя и скелетной мышцы радужной форели, с применением коммерческих наборов реагентов «GM Tissue» («Raissol», Россия) и «Amex», («Raissol», Россия), соответственно.

Применение метода экстракции ДНК на основе сорбции на силикагель (производные диоксида кремния), показало в среднем более низкие концентрации целевой ДНК, из всех типов тканей животных, в сравнении с методами сорбции на магнитные частицы и осаждении спиртом. Данный метод отличался наиболее низкой стабильностью и воспроизводимостью получаемых концентраций целевой ДНК. Наиболее эффективным данный метод оказался для экстракции ДНК из скелетной мышцы и слизи радужной форели, с применением коммерческого набора реагентов «РИБО-сорб» («AmpliSens», Россия). Минимальные средние значения концентрации целевой ДНК, методом сорбции на силикагель, были получены в препаратах из копыт и костных рогов северного оленя, а также хрящевой ткани радужной форели, с применением коммерческого набора реагентов «D-Tissues» («Биолабмикс», Россия).

Таким образом, на основании полученных результатов, показано, что исследование каждого нового образца тканей животных, в экспертно-криминалистической деятельности, должен начинаться с подбора оптимальных условий экстракции ДНК, для получения препаратов пригодных для дальнейших молекулярно-генетических исследования.

Литература

1. Антонова О.С., Корнева Н.А., Белов Ю.В., Курочкин В.Е. Эффективные методы выделения нуклеиновых кислот для проведения анализов в молекулярной биологии (обзор) // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 1. С 3-9.
2. Веснина С.Н., Неустоева А.В., Степанюгин К.В. Организационно-тактические формы использования специальных знаний при расследовании уголовных дел по незаконной охоте // Право и государство: теория и практика. 2020. № 9 (189). С. 152-154.
3. Перепечина И.О. Криминалистические методы ДНК-анализа: выход за традиционные рамки // Вестник Московского университета МВД России. 2019. № 4. С. 191-194.
4. Петров Д.Г., Макарова Е.Д., Гермаш Н.Н., Антифеев И.Е. Методы выделения и очистки ДНК из лизатов клеток (обзор) // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 4. С. 28-50.
5. Яровенко В.В., Караваев А.В. Криминалистическая характеристика и неотложные следственные действия по делам о незаконной охоте // Вопросы права и политики. 2013. № 5. С. 351-377.
6. Barbosa C., Nogueira S., Gadanho M., Chaves S. DNA extraction: findig the most suitable method // Molecular Microbial Diagnostic Methods: Pahtways to Implementation for the Food and Water Industries. Elsevier Inc. 2016. Chapter 7. P. 135-154.
7. Bo Y.Y., Liang L.D., Hua Y.J., Zhao Z., Yao M.S., Shan L.B., Liang C.Z. High-purity DNA extraction from animal tissue using picking in the TRIzol-based method // Biotechniques. 2021. Vol. 70(3). P. 186-190.
8. Elwick K., Gauthier Q., Rink S., Cropper E., Kavlick M.F. Recovery of DNA from fired and unfired cartridge casings: comparison of two DNA collection methods // Forensic Sci Int Genet. 2022. Vol. (9). P. 102726.
9. Ivanov P.L., Kaganova N.L. Optimization of methods for DNA extraction from objects of forensic medical examination // Sud Med. Ekspert. 2009. Vol 52(5). P 14-17.
10. Kejnovský E., Kypr J. DNA extraction by zinc // Nucleic Acids Res., 1997. Vol. 1, 25(9). P.1870-1871.
11. Koshy L, Anju A.L., Harikrishnan S., Kutty V.R., Jissa V.T., Kurikesu I., Jayachandran P., Jayakumaran Nair A., Gangaprasad A., Nair G.M, Sudhakaran P.R. Evaluating genomic DNA extraction methods from human whole blood using endpoint and real-time PCR assays // Mol Biol Rep. 2017. Vol. 44(1). P. 97-108.
12. Lee S.B., Shewale J.G. DNA extraction methods in forensic analysis // Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons, 2017. P. 1-18. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a1104m>
13. Mathieson W., Thomas G.A. Simultaneously extracting DNA, RNA, and protein using kits: is sample quantity or quality prejudiced? // Anal Biochem. 2013. Vol. 1. 433(1). P. 10-18.
14. Mohammadi A., Ghorbani Alvanegh A., Khafaei M., Habibi Azarian S., Naderi M., Kiyani E., Miri A., Bahmani H., Ramezani M., Tavallaei M. A new and efficient method for DNA extraction

from human skeletal remains usable in DNA typing // *Journal of Applied Biotechnology Reports*. 2017. P. 609-614.

15. Molbert N., Ghanavi H.R., Johansson T., Mostadius M., Hansson M.C. An evaluation of DNA extraction methods on historical and roadkill mammalian specimen // *Sci Rep*. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39465-z>

16. Sajali N, Wong SC, Hanapi UK, Abu Bakar Jamaluddin S, Tasrip NA, Mohd Desa MN. The Challenges of DNA Extraction in Different Assorted Food Matrices: A Review. *J Food Sci*. 2018. Vol. 83(10). P. 2409-2414.

17. Shi X.J., Liu G., Zhang M., Zhao J., Li H., Yang Z., Bai H., Liang P., Lu Y. Membrane-sensitive bacterial DNA extractions and absolute quantitation of recovery efficiencies // *Sci Total Environ.*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>

18. Thatcher S.A. DNA/RNA preparation for molecular detection // *Clin. Chem*. 2015. Vol. 61(1). P. 89-99. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2014.221374>

19. Wang T.Y., Wang L., Zhang J.H., Dong W.H. A simplified universal genomic DNA extraction protocol suitable for PCR // *Genet. Mol. Res*. 2011. Vol. 1. P. 519-525.

20. Yagudaeva E., Zybin D., Vikhrov A., Prostyakova A., Ischenko A., Zubov V., Kapustin D. Sorption of nucleic acids and proteins on polyaniline and polyaramide nano-coatings as studied by spectral-correlation interferometry in a real time mode // *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2018. Vol (1;163). P. 83-90.

References

1. Antonova, O.S., Korneva, N.A., Belov, Yu.V. & Kurochkin, V.E. (2010). E`ffektivny`e metody` vy`deleniya nukleinyx` kislot dlya provedeniya analizov v molekulyarnoj biologii (obzor). *Nauchnoe priborostroenie*, 20(1), 3-9. (in Russ.).

2. Vesnina, S.N., Neustoeva, A.V., & Stepanyugin, K.V. (2020). Organizacionno-takticheskie formy` ispol`zovaniya special`nyx` znaniy pri rassledovanii ugolovnyx` del po nezakonnoj oxote. *Pravo i gosudarstvo: teoriya i praktika*, 9(189), 152-154. (in Russ.).

3. Perepechina I.O. (2019). Kriminalisticheskie metody` DNK-analiza: vy`hod za tradicionny`e ramki. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*, 4, 191-194. (in Russ.).

4. Petrov, D.G., Makarova, E.D., Germash, N.N., & Antifeev, I.E. (2019). Metody` vy`deleniya i ochistki DNK iz lizatov kletok (obzor). *Nauchnoe priborostroenie*, 29(4), 28-50. (in Russ.).

5. Yarovenko V.V., & Karavaev A.V. (2013). Kriminalisticheskaya xarakteristika i neotlozhny`e sledstvenny`e dejstviya po delam o nezakonnoj oxote. *Voprosy` prava i politiki*, 5, 351-377. (in Russ.).

6. Barbosa, C., Nogueira, S., Gadanho, & M., Chaves, S. (2016). DNA extraction: findig the most suitable method. In *Molecular Microbial Diagnostic Methods: Pahtways to Implementation for the Food and Water Industries* (Ch. 7). Elsevier Inc., 135-154.

7. Bo, Y.Y., Liang, L.D., Hua, Y.J., Zhao, Z., Yao, M.S., Shan, L.B., & Liang, C.Z. (2021). High-purity DNA extraction from animal tissue using picking in the TRIzol-based method. *Biotechniques*, 70(3), 186-190.

8. Elwick, K., Gauthier, Q., Rink, S., Cropper, & E., Kavlick, M.F. (2022). Recovery of DNA from fired and unfired cartridge casings: comparison of two DNA collection methods. *Forensic Sci Int Genet*, 9, 102726
9. Ivanov, P.L., & Kaganova, N.L. (2009). Optimization of methods for DNA extraction from objects of forensic medical examination. *Sud Med. Ekspert*, 52(5), 14-17. (in Russ.).
10. Kejnovský, E., & Kypr, J. (1997). DNA extraction by zinc. *Nucleic Acids Res.*, 1, 25(9), 1870-1871.
11. Koshy, L., Anju, A.L., Harikrishnan, S., Kutty, V.R., Jissa, V.T., Kurikesu, I., Jayachandran, P., Jayakumaran, Nair A., Gangaprasad, A., Nair, & G.M, Sudhakaran, P.R. (2017). Evaluating genomic DNA extraction methods from human whole blood using endpoint and real-time PCR assays. *Mol Biol Rep*, 44(1), 97-108.
12. Lee, S.B., & Shewale, J.G. (2017). DNA extraction methods in forensic analysis. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (pp. 1-18.). John Wiley & Sons, <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a1104m>
13. Mathieson, W., & Thomas, G.A. (2013). Simultaneously extracting DNA, RNA, and protein using kits: is sample quantity or quality prejudiced? *Anal Biochem*, Vol. 1, 433(1), 10-18.
14. Mohammadi, A., Ghorbani, Alvanegh A., Khafaei, M., Habibi, Azarian S., Naderi, M., Kiyani, E., Miri, A., Bahmani, H., Ramezani, M., & Tavallaei, M. (2017). A new and efficient method for DNA extraction from human skeletal remains usable in DNA typing. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 609-614.
15. Molbert, N., Ghanavi, H.R., Johansson, T., Mostadius, M., & Hansson, M.C. (2023). An evaluation of DNA extraction methods on historical and roadkill mammalian specimen. *Sci Rep*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39465-z>
16. Sajali, N, Wong, SC, Hanapi, UK, Abu Bakar Jamaluddin, S, Tasrip, NA, Mohd, & Desa MN. (2018). The Challenges of DNA Extraction in Different Assorted Food Matrices: A Review. *J Food Sci.*, 83(10), 2409-2414.
17. Shi, X.J., Liu, G., Zhang, M., Zhao, J., Li, H., Yang, Z., Bai, H., Liang, P., & Lu, Y. (2020). Membrane-sensitive bacterial DNA extractions and absolute quantitation of recovery efficiencies. *Sci Total Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>
18. Thatcher, S.A. (2015). DNA/RNA preparation for molecular detection. *Clin. Chem*, 61(1), 89-99. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2014.221374>
19. Wang, T.Y., Wang, L., Zhang, J.H., & Dong, W.H. (2011). A simplified universal genomic DNA extraction protocol suitable for PCR. *Genet. Mol. Res*. Vol. 1. P. 519-525
20. Yagudaeva, E., Zybin, D., Vikhrov, A., Prostyakova, A., Ischenko, A., Zubov, V., & Kapustin, D. (2018). Sorption of nucleic acids and proteins on polyaniline and polyaramide nano-coatings as studied by spectral-correlation interferometry. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 1(163), 83-90.

дата поступления: 20.06.2023

дата принятия: 30.11.2023

© Филиппова А.В., Рябухина М.В., Одинокоев Г.Н., Карпова Н.Г., 2024

УДК 612.13

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/08>

*O.N. Ragozin, I.A. Pogonysheva, E.Yu. Shalamova, D.A. Pogonyshv,
V.V. Postnikova, M.S. Kuchumov*

HEMODYNAMIC INDICATORS OF NORTH RESIDENTS ENGAGED IN WINTER SWIMMING

*Рагозин О.Н., Погонишева И.А., Шаламова Е.Ю., Погонишев Д.А.,
Постникова В.В., Кучумов М.С.*

ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖИТЕЛЕЙ СЕВЕРА, ЗАНИМАЮЩИХСЯ МОРЖЕВАНИЕМ

Abstract. The purpose of the study is to assess changes in hemodynamic parameters in areas of the northern city (Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra) under the influence of extreme cold temperature. Determination of hemodynamic parameters was carried out by compression oscillometry method using the АПКО-8-RITS-M circulatory parameters analyzer. Results: under the influence of extreme cold water, all subjects showed an increase in the values of systolic and mean arterial pressure and pulse pressure. There was an increase in cardiac output, stroke volume of blood, cardiac index and stroke index; significant differences in the dynamics of these indicators were revealed. For the majority of surveyed people (77.7%), engaged in winter swimming, a tendency to increase arterial stiffness under conditions of general cold stress was revealed. Conclusion: in general, the tolerance of extreme cold stress in men can be assessed as satisfactory, since on average there is an increase in cardiac output, largely due to stroke output; there is a correspondence between the actual resistance of peripheral vessels and the working specific peripheral resistance. Since there were no significant changes in the diameter of the brachial artery with an increase of pulse wave velocity after swimming in cold water, this suggests the preservation of the observed elastic properties of the vascular wall. Data obtained from a limited number of examined people indicate the possibility of identifying the initial stages of disorders of the elastic properties of the aorta using compression oscillometry and

Аннотация. Цель исследования – оценить изменение гемодинамических показателей жителей северного города (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) под влиянием экстремального холодового температурного воздействия. Определение гемодинамических показателей проводилось методом компрессионной осциллометрии с использованием анализатора параметров кровообращения «АПКО-8-РИЦ-М». Результаты: под воздействием экстремальной холодной акванаврузки у всех обследуемых мужчин отмечено увеличение значений систолического и среднего артериального давления, пульсового давления; отмечалось повышение сердечного выброса, ударного объема крови, сердечного индекса, ударного индекса, в динамике этих показателей выявлены значимые отличия. Для большинства обследованных (77,7%), занимающихся моржеванием, выявили тенденцию к увеличению жесткости артерий в условиях общего холодового стресса. Выводы: в целом переносимость экстремальной холодовой нагрузки у мужчин может оцениваться как удовлетворительная, так как в среднем происходит увеличение сердечного выброса в большей степени за счет ударного выброса; наблюдается соответствие фактического удельного сопротивления периферических сосудов рабочему удельному периферическому сопротивлению. Так как не отмечено значимых изменений диаметра плечевой артерии при приросте показателей скорости пульсовой волны после плавания в холодной воде, это позволяет предполагать сохранность у обследуемых эластических свойств сосудистой стенки. Полученные на ограниченном количестве обследуемых данные, свидетельствуют о возможности выявления начальных стадий

expanding the capabilities of early diagnosis of signs of aortic stiffness.

Keywords: compression oscillometry; hemodynamic parameters; winter swimming; north; adaptation.

About the authors: Oleg N. Ragozin, ORCID: 0000-0002-5318-9623, Doctor of Medical Sciences, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk, Russia; Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, oragozin@mail.ru; Irina A. Pogonysheva, ORCID: 0000-0002-5759-0270, Candidate of Biological Sciences, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, severina.i@bk.ru; Elena Yu. Shalamova, ORCID: 0000-0001-5201-4496, Doctor of Biological Sciences, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk, Russia, selenzik@mail.ru; Denis A. Pogonyshev, ORCID: 0000-0001-8815-1556, Candidate of Biological Sciences, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, dapogonyshev@nvsu.ru; Victoria V. Postnikova, ORCID: 0000-0001-7846-7864, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, missmadcon@mail.ru; Mihail S. Kuchumov, ORCID: 0000-0003-4714-5023, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, mixaelok@mail.ru

нарушения эластических свойств аорты с помощью компрессионной осциллометрии и расширении потенциала ранней диагностики признаков жесткости аорты.

Ключевые слова: компрессионная осциллометрия; гемодинамические показатели; моржевание; север; адаптация.

Сведения об авторах: Рагозин Олег Николаевич, ORCID: 0000-0002-5318-9623, д-р мед. наук, Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, г. Ханты-Мансийск, Россия; Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, oragozin@mail.ru; Погоньшева Ирина Александровна, ORCID: 0000-0002-5759-0270, канд. биол. наук, Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, severina.i@bk.ru; Шаламова Елена Юрьевна, ORCID: 0000-0001-5201-4496, д-р биол. наук, Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, г. Ханты-Мансийск, Россия, selenzik@mail.ru; Погоньшев Денис Александрович, ORCID: 0000-0001-8815-1556, канд. биол. наук, Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, dapogonyshev@nvsu.ru; Постникова Виктория Владимировна, ORCID: 0000-0001-7846-7864, Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, missmadcon@mail.ru; Кучумов Михаил Сергеевич, ORCID: 0000-0003-4714-5023, Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, mixaelok@mail.ru

Ragozin O.N., Pogonysheva I.A., Shalamova E.Yu., Pogonyshev D.A., Postnikova V.V., Kuchumov M.S. Hemodynamic Indicators of North Residents Engaged in Winter Swimming // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 86-95. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/08>

Ragozin, O.N., Pogonysheva, I.A., Shalamova, E.Yu., Pogonyshev, D.A., Postnikova, V.V., & Kuchumov, M.S. (2024). Hemodynamic Indicators of North Residents Engaged in Winter Swimming. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 86-95. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/08>

According to the literature data, such a social phenomenon as “winter swimming” refers to the hardening system and combines different types of cold exposure (immersion in cold water, winter swimming, winter sports swimming). Interest in winter swimming has been increasing in recent years; people visit amateur clubs and sports sections [5; 6]. The influence of extreme cold exposure on the human body and, in particular, on the cardiovascular system, is assessed ambiguously; the observed functional manifestations illustrate complex adaptation to the stress factor.

Several foreign studies describe the positive effects of winter swimming on the cardiovascular system; there is a decrease in the risk of cardiovascular diseases, normalization of

the lipid profile [3; 7; 13] and blood pressure (BP) [10]. Results have been published showing an increase in systolic blood pressure (SBP) and diastolic blood pressure (DBP) by 20 mmHg in the first 60 seconds of extreme cold exposure, which was a hyperreactivity observed mainly in subjects with hypertension or in individuals prone to hypertension in later life [15]. Indian scientists assessed the cardiovascular system's response to cold using a stress test. Healthy young people immersed their hands up to the wrist in cold water with a temperature of 5°C. Before the test and 1, 3 and 5 minutes after the dive, blood pressure measurements were taken with a sphygmomanometer. The majority of subjects had a statistically significant increase in blood pressure, diastolic by 16.02%, systolic by 12.10%. An increase in heart rate (HR) by 23.09% was also detected. Heart rate increased significantly after 1 minute of immersion and by the end of 5 minutes it almost reached normal values ($p < 0.05$). Despite the statistically significant increase in these indicators, they were within normal limits [14].

According to Popov A.V., Suxovej, Yu.G. et al. (2003), prolonged cold exposure can lead to depletion of functional systems that implement adaptation mechanisms, including the immune system. The authors note the different effects of cryogenic regimes on organs and systems, which depend on the premorbid background; primarily the fitness of the body, the presence of chronic diseases, clinical and anamnestic signs of immune deficiency, etc. [16; 17]. E.G. Kostolomova (2006) conducted a comparative analysis of the parameters of the immune system of “almost healthy people” and “winter swimmers” in response to immersion in ice water. It was revealed that “winter swimmers” develop a special type of immune status, manifested by a redistribution of the activation-proliferative component of the lymphocyte-cell link, an increase in the level of immunoglobulins of classes M and G against the background of a decrease in large-molecular circulating immune complexes, a decrease in the intensity of phagocytosis of neutrophils and the activity of oxygen-dependent metabolism of monocytes [12].

A number of authors believe that in the process of hardening, especially winter swimming, the psycho-emotional state is normalized, increases efficiency, and anxiety decreases [5; 6]. It was also found that regular winter swimming can have a beneficial effect on the sleep and well-being of patients diagnosed with depression. The study involved patients aged 20 to 69 years who practiced cold water swimming twice a week [8]. According to the results of a study by P. Huttunen, L. Kokko, V. Ylijukuri (2004), at the end of a four-month period of winter swimming, swimmers felt more energetic, active and cheerful, compared to the examined of the control group. All swimmers with a history of rheumatism and/or fibromyalgia reported that winter swimming relieved their pain [9].

The effect of regular winter immersion in water on the activity of the sympathoadrenal system was studied. Some findings suggest that winter swimming significantly activates the sympathetic nervous system even after cold acclimation, without affecting the adrenal medulla. The change in plasma epinephrine levels is likely dependent on the level before cold exposure. Swimmers whose plasma adrenaline levels dropped during the test dive had higher pre-dive levels than those whose adrenaline levels increased. Individual characteristics may also influence the

amount of cortisol released in response to cold exposure. These results may explain why some “winter swimmers” find swimming in ice-cold water stimulating while others find it relaxing [11].

The circulatory system plays a significant role during adaptation to extreme hypothermic exposure. The purpose of the study is to evaluate changes in hemodynamic parameters under the influence of extreme cold temperature exposure.

The study was conducted in the suburbs of Nizhnevartovsk (KhMAO-Yugra, a region equated to the regions of the Far North), Lake Molodezhnoye. At the time of the study (February 28, 2023), the following weather conditions were recorded: air temperature was -5°C ; water temperature $+1.8^{\circ}\text{C}$; atmospheric pressure 743 mmHg.; southern wind at a speed of 5.7 m/s; air humidity 84%. The temperature of water and air didn't change during the study. Members of the “Bodryachok” club engaged in winter swimming, a total of 39 people, were examined. We interpreted hemodynamic parameters in subjects with initially normal blood pressure values, according to national and European recommendations of cardiologists [2; 4]. The table presents the results of 18 men with initial blood pressure corresponding to normal values, who are in the second period of adulthood. 21 people (53.8%) were excluded from the analyzed sample because 20 minutes before immersion in cold water they had high resting blood pressure (the threshold of 140/90 mmHg was exceeded). The average age of the formed sample is 43.4 ± 1.5 years. The hardening experience averaged 2.1 ± 0.14 g. The average time spent in cold water was 2.4 ± 0.5 minutes. The study was approved by the Local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nizhnevartovsk State University” (Protocol No. 1 dated 01/23/2023). All participants signed voluntary informed consent to participate in the study.

Determination of hemodynamic parameters was carried out by compression oscillometry method using the APKO-8-RITS-M circulatory parameters analyzer (automatic non-invasive complex for express diagnostics of the cardiovascular system). The technique allows to determine the pulse wave velocity (PWV) on the brachial artery by computer analysis of changes in the instantaneous values of the volume of the brachial artery and the pressure in it under the influence of increasing pressure in the pinch cuff. The advantage of this method is the ability to determine, in addition to PWV, 17 more vascular and cardiac parameters. Oscillometric determination of linear parameters of blood flow in the brachial artery is a reliable way to study not only peripheral, but also central hemodynamics [1, 18]. Hemodynamic parameters were measured twice: before swimming in cold water (20 minutes); immediately after the end of cold exposure.

The Excel 2010 and Statistica 10.0 software package was used for statistical processing of primary data. The normality of the distribution of these characteristics was checked using the Kolmogorov–Smirnov test. For comparative analysis, the nonparametric Mann-Whitney test for two independent samples was used. The data is presented in the form: $M \pm m$ (M – arithmetic mean, m – error of the arithmetic mean). The significance level (p) was calculated: differences between the compared values were considered significant at ($p \leq 0.05$).

As it turned out, in 13 subjects (72%) 20 minutes before extreme cold exposure, SBP increased to an average of 132.2 ± 2.85 mmHg (measured using the Korotkov method –

auscultatory method), which is possibly the body's reaction to upcoming stress and is implemented through the mechanism of a conditioned reflex (see table).

Table

Hemodynamic parameters of men engaged in winter swimming (n=18)

Indicator	Value (M±m)		Resting value
	before cold exposure	after cold exposure	
Blood pressure according to compression oscillometry method			
SBP, mmHg	118,5±2,65	124,7±2,84*	86–109
DBP, mmHg	64,2±1,67	63,5±1,70	50–71
MAP, mmHg	91,2±2,04	93,4±2,10	75–97
PP, mmHg	54,4±1,16	61,8±1,35*	25–40
Cardiac activity			
HR, bpm	61,7±1,05	59,2±1,24	60–90
CO, L/min	5,1±0,23	6,3±0,38*	5,0 ± 1,5 ind. norm
SV, L/min/m²	2,9±0,20	3,6±0,15*	3,0 ± 1,0 ind. norm
CI, ml	84,2±2,05	121,3±2,87*	70 ± 20 ind. norm
SI, ml/m²	47,4±1,18	69,3±1,75*	40 ± 10 ind. norm
Vascular parameters			
BAD, cm	0,38±0,04	0,27±0,06	0,3–0,6
BAC, ml/mmHg	0,12±0,02	0,25±0,04	0,03–0,3
LBFV, cm/sec	62,3±2,95	66,2±2,86	90 ± 30
PWV, cm/sec	590,5±12,04	657,8±15,95*	500–900 ind. norm
TPR, ml/mmHg	2,2±0,07	2,78±0,09	0,3–3,0 ind. norm
TPR, din*cm ⁻⁵ *sec	1425,6±64,28	1178,5±59,45*	1100–2100
PVP, %	103,1±9,47	109,3±10,05	85–115
Blood pressure according to Korotkov			
SBP, mmHg	132,2±2,85	144,1±2,69*	<129 (120–129)
DBP, mmHg	80,3±1,98	82,4±2,03	<84 (80–84)

Note: * – significance of differences in indicators under the influence of extreme cold water.

Ind. norm – the value of the indicator is assessed by deviation from the range of the individual norm for each subject [1].

According to the results of compression oscillometry, at rest in the examined sample, an increase in the average values of SBP and pulse pressure (PP) was detected; the average values of DBP and MAP were within normal limits. Under the influence of extreme cold water, all subjects showed an increase in the values of SBP, PP, and MAP. Significant differences were revealed in the parameters of SBP and PP; there were no significant differences in the parameters of DBP and MAP (see table).

After swimming in cold water, a decrease in heart rate was found in 66.6% of the examined men; no significant differences were found. Such a paradoxical reaction may indicate overstrain of the sympathetic division and parallel activation of the parasympathetic division of the autonomic nervous system under conditions of such extreme exposure as general cold stress. After

cold exposure, all subjects showed an increase in cardiac output (CO), stroke volume (SV), cardiac index (CI), stroke index (SI), and linear blood flow velocity (LBFV). Significant differences were revealed in the dynamics of these indicators. It should be noted that an excessive increase in SV may be a risk factor for arterial hypertension. The brachial artery diameter (BAD) after extreme cold water decreased insignificantly; no decrease in brachial artery compliance (BAC) was noted (see table).

In general, the tolerance of extreme cold stress in the examined can be assessed as satisfactory, since on average there is an increase in cardiac output (CO) to a greater extent due to stroke output; there is a correspondence between the actual specific resistance of peripheral vessels and the working specific peripheral resistance.

For the majority of examined (77.7%), a tendency towards an increase in arterial stiffness under conditions of general cold stress was revealed. The device used determines the stiffness of the arterial bed by increasing the speed of propagation of the pulse wave. The pulse wave velocity in 77.7% of men was higher than the individual norm (see table). A decrease in the elastic properties of the brachial artery was confirmed by an increase in the amplitude of oscillations during compression oscillometry. The mean arterial diameter showed a statistically insignificant decrease after cold exercise. Since there were no significant changes in the diameter of the brachial artery with an increase in pulse wave velocity after swimming in cold water, this suggests that the elastic properties of the vascular wall were preserved in the subjects.

The value of total peripheral vascular resistance (TPR), which is determined by the degree of patency of the precapillary bed, was within the normal range in all subjects before and after the influence of cold water; on average, it decreased after swimming in cold water. The values of vascular compliance (VC), which is functionally consistent with blood pressure, as well as with changes in vascular elasticity, didn't go beyond the individual norm; on average, after swimming in cold water, TPR didn't increase significantly. The degree of peripheral vascular patency (PVP) was on average normal; after swimming there was a tendency to a constrictor reaction of peripheral vessels; no significant differences were found (see table).

Conclusion. The data obtained on a limited number of subjects indicate the possibility of identifying the initial stages of a violation of the elastic properties of the aorta using compression oscillometry and expanding the possibilities of early diagnosis of signs of aortic stiffness. Such changes indicate additional stress on the vascular system as a whole. This is confirmed by the data recorded from examined using the APKO-8-RITS-M apparatus, in particular by an increase in the speed of the pulse wave. The results obtained indicate the importance of systematic monitoring of the functional state of a group of participants in extreme cold hardening. First of all, it is necessary to control the level of systolic and diastolic blood pressure before swimming in cold water, which shouldn't exceed the threshold of 140/90 mmHg. Such precautions will help prevent the development of cardiovascular pathology.

Acknowledgments. The authors thank Sergei Leonidovich Udintsev, chairman of the Bodryachok club, Nizhnevartovsk.

Financing. The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation and the Government of Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra No. 22-15-20023, <https://rscf.ru/project/22-15-20023>

References

1. APKO-8-RICz-M. Analizator parametrov serdechnogo vy`broza i arterial`nogo davleniya oscillometricheskij. Metodicheskie rekomendacii. Vostochno-evropejskij centr innovacionny`x tehnologij. Moskva, 2006. (in Russ.) .
2. Cardiovascular prevention 2017. National guidelines (2018). *Russian Journal of Cardiology*, 23(6), 7-122. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2018-6-7-122>. (in Russ.).
3. Checinska-Maciejewska, Z., Miller-Kasprzak, E., Checinska, A., Korek, E., Gibas-Dorna, M., Adamczak-Ratajczak, A., Bogdanski, P., & Krauss, H. (2017). Gender-related effect of cold water swimming on the seasonal changes in lipid profile, ApoB/ApoA-I ratio, and homocysteine concentration in cold water swimmers. *Journal of physiology and pharmacology: an official journal of the Polish Physiological Society*, 68(6), 887–896.
4. ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension (2018). *Russian Journal of Cardiology*, 23(12), 143-228. <http://dx.doi.org/10.15829/1560-4071-2018-12-143-228> (in Russ.)
5. Fisher, T.A., Docenko, E.L., Petrov, S.A., & Frolova, O.V. (2015). Winter swimming as a way of improvement the life quality. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*, (5-2), 528-533. (in Russ.).
6. Fisher, T.A., Koly`vanova, S.S., Pushnikov, A.A. & Lepunova, O.N. (2020). The dynamics of hemodynamic, psychophysiological parameters and adaptive potential of men of working age engaged in water-cold hardening. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*, 97(6), 40-49. <https://doi.org/10.17116/kurort20209706140> (in Russ.)
7. Gibas-Dorna, M., Checinska, Z., Korek, E., Kupsz, J., Sowinska, A., Wojciechowska, M., Krauss, H., & Piątek J. (2016). Variations in leptin and insulin levels within one swimming season in non-obese female cold water swimmers. *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation*, 76(6), 486–491. <https://doi.org/10.1080/00365513.2016.1201851>
8. Hjorth, P., Sikjær, M.G., Løkke, A., Jørgensen, A.M., Jørgensen, N., Kaasgaard, D.M., & Rasmussen, M.R.V. (2023). Cold water swimming as an add-on treatment for depression: a feasibility study. *Nordic journal of psychiatry*, 77(7), 706–711. <https://doi.org/10.1080/08039488.2023.2228290>
9. Huttunen, P., Kokko, L., & Ylijukuri, V. (2004). Winter swimming improves general well-being. *International Journal of Circumpolar Health*, 63(2), 140-144. <https://doi.org/10.3402/ijch.v63i2.17700>
10. Huttunen, P., Lando, N.G., Meshtsheryakov, V.A., & Lyutov, V.A. (2000). Effects of long-distance swimming in cold water on temperature, blood pressure and stress hormones in winter swimmers. *Journal of Thermal Biology*, 25(2), 171-174. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(99\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(99)00059-5)

11. Huttunen, P., Rintamäki, H., & Hirvonen, J. (2001). Effect of regular winter swimming on the activity of the sympathoadrenal system before and after a single cold water immersion. *International Journal of Circumpolar Health*, 60(3), 400-406. <https://doi.org/10.1080/22423982.2001.12113043>
12. Kostolomova, E.G. (2006). *Sopryazhennost` immunofiziologicheskix reakcij makroorganizma i izolirovanny`x immunokompetentny`x kletok pri razlichny`x rezhimax kriovozdejstviya: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kand. biol. nauk.* Tyumen. (in Russ.).
13. Kralova Lesna, I., Rychlikova, J., Vavrova, L., & Vybiral, S. (2015). Could human cold adaptation decrease the risk of cardiovascular disease? *Journal of thermal biology*, 52, 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2015.07.007>
14. Mishra, S., Manjareeka, M., & Mishra, J. (2012). Blood pressure response to cold water immersion test. *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences*, 1(10), 1483-1491
15. Murray, A.G., Adolph, J.B., George, A.L., & Edward, R. (1965). Circulatory dynamics during the cold pressor test. *The American Journal of Cardiology*, 16(1), 54-60. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(65\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0002-9149(65)90007-X)
16. Popov, A.V., Suxovej, Yu.G., Petrov S.A., & Kostolomova E.G. (2003). Dinamika pokazatelej immunnogo statusa do i posle pogruzheniya v ledyanuyu vodu u licz, zanimayushhixsia zimnim plavaniem. *Medicinskaya immunologiya*, 5(3-4), 383-384. (in Russ.).
17. Suxovej, Yu.G., Popov, A.V., & Kostolomova, E.G. (2003). Vliyanie gipotermicheskogo vozdejstviya ledyanoj vody` na immunny`e xarakteristiki adaptirovanny`x licz. *Immunologiya Urala*, (1), 62-63. (in Russ.).
18. Trivozhenko, A.B., Semenova, Yu.V., & Shiryayev, A.A. (2019). Assessment of central hemodynamics by the method of volumetric compression of oscillometry. *Medical alphabet*, 2(12), 18-23. (in Russ.).

Литература

1. АПКО-8-РИЦ-М. Анализатор параметров сердечного выброса и артериального давления осциллометрический. Методические рекомендации. Восточно-европейский центр инновационных технологий. Москва. 2006. 35 с.
2. Кардиоваскулярная профилактика 2017. Российские национальные рекомендации // Российский кардиологический журнал. 2018. Т. 23. № 6. С. 7-122. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2018-6-7-122>
3. Checinska-Maciejewska Z., Miller-Kasprzak E., Checinska A., Korek E., Gibas-Dorna M., Adamczak-Ratajczak A., Bogdanski P., Krauss, H. Gender-related effect of cold water swimming on the seasonal changes in lipid profile, ApoB/ApoA-I ratio, and homocysteine concentration in cold water swimmers // *Journal of physiology and pharmacology: an official journal of the Polish Physiological Society*. 2017. Vol. 68. No. 6. P. 887–896.

4. ЕОК/ЕОАГ рекомендации по лечению больных с артериальной гипертензией // Российский кардиологический журнал. 2018. Т. 23. № 12. С. 143-228. <http://dx.doi.org/10.15829/1560-4071-2018-12-143-228>
5. Фишер Т.А., Доценко Е.Л., Петров С.А., Фролова О.В. Моржевание как способ повышения качества жизни // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. № 5-2. С. 528-533.
6. Фишер Т.А., Колыванова С.С., Пушников А.А., Лепунова О.Н. Изменение гемодинамических, психофизиологических показателей и адаптационного потенциала мужчин трудоспособного возраста, занимающихся водно-холодовым закаливанием // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2020. Т. 97. № 6. С. 40-49. <https://doi.org/10.17116/kurort20209706140>
7. Gibas-Dorna M., Checinska Z., Korek E., Kupsz J., Sowinska A., Wojciechowska M., Krauss H., Piątek J. Variations in leptin and insulin levels within one swimming season in non-obese female cold water swimmers // Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation. 2016. Vol. 76. No. 6. P. 486–491. <https://doi.org/10.1080/00365513.2016.1201851>
8. Hjorth P., Sikjær M.G., Løkke A., Jørgensen A.M., Jørgensen N., Kaasgaard D.M., Rasmussen M.R.V. Cold water swimming as an add-on treatment for depression: a feasibility study // Nordic journal of psychiatry. 2023. Vol. 77. No. 7. P. 706–711. <https://doi.org/10.1080/08039488.2023.2228290>
9. Huttunen P., Kokko L., Ylijukuri V. Winter swimming improves general well-being // International Journal of Circumpolar Health. 2004. Vol. 63. No. 2. P. 140-144. <https://doi.org/10.3402/ijch.v63i2.17700>
10. Huttunen P., Lando N.G., Meshtsheryakov V.A., Lyutov V.A. Effects of long-distance swimming in cold water on temperature, blood pressure and stress hormones in winter swimmers // Journal of Thermal Biology. 2000. Vol. 25. No. 2. P. 171-174. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(99\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(99)00059-5)
11. Huttunen P., Rintamäki H., Hirvonen J. Effect of regular winter swimming on the activity of the sympathoadrenal system before and after a single cold water immersion // International Journal of Circumpolar Health. 2001. Vol. 60. No. 3. P. 400-406. <https://doi.org/10.1080/22423982.2001.12113043>
12. Костоломова Е.Г. Сопряженность иммунофизиологических реакций макроорганизма и изолированных иммунокомпетентных клеток при различных режимах криовоздействия: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. биол. наук. Тюмень. 2006. 18 с.
13. Kralova Lesna I., Rychlikova J., Vavrova L., Vybiral S. Could human cold adaptation decrease the risk of cardiovascular disease? // Journal of thermal biology. 2015. Vol. 52. P. 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2015.07.007>
14. Mishra S., Manjareeka, M., Mishra J. Blood pressure response to cold water immersion test // International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences. 2012. Vol. 1. No. 10. P. 1483-1491.

15. Murray A.G., Adolph J.B., George A.L., Edward R. Circulatory dynamics during the cold pressor test // The American Journal of Cardiology. 1965. Vol. 16. No. 1. P. 54-60. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(65\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0002-9149(65)90007-X)

16. Попов А.В., Суховой Ю.Г., Петров С.А., Костоломова Е.Г. Динамика показателей иммунного статуса до и после погружения в ледяную воду у лиц, занимающихся зимним плаванием // Медицинская иммунология. 2003. Т. 5. № 3-4. С. 383-384.

17. Суховой Ю.Г., Попов А.В., Костоломова Е.Г. Влияние гипотермического воздействия ледяной воды на иммунные характеристики адаптированных лиц // Иммунология Урала. 2003. № 1. С. 62-63.

18. Тривоженко А.Б., Семенова Ю.В., Ширяев А.А. Оценка состояния центральной гемодинамики методом компрессионной объемной осцилометрии // Медицинский алфавит. 2019. Т. 2. № 12. С. 18-23.

дата поступления: 21.02.2024

дата принятия: 27.04.2024

© Рагозин О.Н., Погонышева И.А., Шаламова Е.Ю.,
Погонышев Д.А., Постникова В.В., Кучумов М.С., 2024

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ / ECOLOGY AND NATURE MANAGEMENT

УДК 550.4

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/09>*Болдырева Е.А., Московченко Д.В.*

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕРХОВЫХ ТОРФОВ БУГРИСТЫХ БОЛОТ ХМАО-ЮГРЫ

E.A. Boldyreva, D.V. Moskovchenko

GEOCHEMICAL FEATURES OF THE TOP PEATS OF THE HUMMOCKY BOGS OF THE Khmao-YUGRA

Аннотация. Бугристые торфяники являются накопителями углерода и способствуют сохранению многолетнемерзлых пород в северных регионах. Однако под влиянием потепления климата и протаивания мерзлоты в торфяниках происходят изменения их биогеохимических свойств. На примере трех разрезов, сделанных на территории природного парка «Нумто» (ХМАО-Югра), где мерзлота крайне неустойчива, определены закономерности распределения элементов в профиле торфяников. Определение микроэлементов в образцах осуществлено с помощью методов масс-спектральной и атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-MS и ICP-OES). Торфа исследуемой территории отличаются низкой зольностью. Отмечено повышенное содержание Fe, Mn, Cr, что характерно для торфов Западной Сибири. Концентрация тяжелых металлов, традиционно рассматриваемых в качестве индикаторов техногенного загрязнения (Cd, Pb, Cr, Ni, Cu) в торфах низкая вследствие удаленности от источников техногенеза. На внутрипрофильное распределение металлов влияет ботанический состав торфа. Кустарничковый торф, по сравнению со сфагновым, отличается повышенным содержанием Pb, Cu, Cd.

Ключевые слова: бугристые болота; Западная Сибирь; элементный состав торфа, тяжелые металлы; радиальная геохимическая структура; сфагновый торф; кустарничковый верховой торф; валовое содержание.

Сведения об авторах. Болдырева Елизавета Ахмедовна, ORCID: 0000-0003-2964-1226, ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия, leta-92@list.ru; Московченко Дмитрий Валерьевич, ORCID: 0000-0001-6338-7669, ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия, moskovchenko1965@gmail.com

Abstract. Palsa bogs are carbon sinks and help preserve permafrost in northern regions. However, under the influence of climate warming and permafrost thawing in peatlands, changes in their biogeochemical properties occur. Using the example of three sections made on the territory of the Numto Natural Park (KhMAO-Yugra), where the permafrost is extremely unstable, the distribution patterns of elements in the peat deposit profiles were determined. Determination of trace elements in the samples was carried out using mass spectral and atomic emission spectroscopy methods (ICP-MS and ICP-OES). The peat of the study area is characterized by low ash content. An increased content of Fe, Mn, and Cr was noted, which is typical for the peat of Western Siberia. The concentration of heavy metals traditionally considered as indicators of technogenic pollution (Cd, Pb, Cr, Ni, Cu) in peat is low due to the remoteness from the sources of technogenesis. The intraprofile distribution of metals is influenced by the botanical composition of peat. Dwarfshrub peat, compared to Sphagnum peat, has a higher content of Pb, Cu and Cd.

Keywords: palsa bogs; Western Siberia; elemental composition of peat; heavy metals; radial geochemical structure; Sphagnum peat; dwarfshrub peat; gross content.

Information about authors. Elizaveta A. Boldyreva, ORCID: 0000-0003-2964-1226, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia, leta-92@list.ru; Dmitriy V. Moskovchenko, ORCID: 0000-0001-6338-7669, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia, moskovchenko1965@gmail.com

Болдырева Е.А., Московченко Д.В. Геохимические особенности верховых торфов бугристых болот ХМАО – Югры // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 96-110. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/09>

Boldyreva, E.A., & Moskovchenko, D.V. (2024). Geochemical Features of the Top Peats of the Hummocky Bogs of the Khmao-Yugra. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 96-110. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/09>

Введение. Торфяные болота Западной Сибири вызывают большой интерес у ученых. Одним из актуальных направлений исследований является анализ элементного состава торфов, что позволяет оценить состояние атмосферы в различные периоды торфонакопления и дает информацию об изменениях климата [16]. На севере Западной Сибири состав торфа также используется для оценки загрязнения от объектов нефтегазодобычи [6; 8; 27]. Ряд статей посвящен распределению отдельных элементов в профилях торфяников: Са, Fe, Mn [3-4], Pb [35]. Сведения о валовом содержании химических элементов, распределению подвижных форм, зависимости элементного состава от ботанического состава торфов и количества органических веществ представлены в [12; 14; 19; 23].

Ландшафты криолитозоны Западной Сибири характеризуются значительной заболоченностью. В лесотундре и северной тайге чрезвычайно широко распространены плоскобугристые болота, площадь которых на широтах 63–68° с.ш. оценивается в 426 тыс. км² [15]. Однако данные о химическом составе торфа бугристых болот криолитозоны Западной Сибири малочисленны. Особенно мало данных о составе торфа на южном пределе криолитозоны, где многолетняя мерзлота сохраняется только в торфяниках [34]. В настоящее время под влиянием потепления климата здесь наблюдается активизация экзогенных процессов – термокарстовое проседание, образование трещин-разрывов с последующей гидроморфизацией, формирование трещин-просадок [2; 29; 30]. Современное потепление климата, приводящее к оттаиванию мерзлых торфов, может изменить биогеохимические циклы в полярных и приполярных ландшафтах и увеличить роль торфяной залежи в формировании гидрохимических параметров поверхностных вод заболоченных водосборов [17; 33]. Это определяет актуальность изучения состава торфа на участках с нестабильным состоянием многолетнемерзлых пород.

Цель исследования – изучить содержание и закономерности распределения элементов, в торфяных залежах южной части криолитозоны. Для этого нами был исследован состав торфа в разрезах на территории природного парка «Нумто» (ХМАО – Югра), где широко распространены мерзлые плоско- и крупнобугристые торфяники, образующие комплексы площадью до нескольких десятков км² [5].

Материалы и методы исследования. Отбор проб торфа выполнен в летний период 2020–2021 гг. Территория исследования располагается в центральной части Западно-Сибирской равнины, на северном склоне возвышенности Сибирские Увалы между 63°10'–

64°20' с.ш., 70°00' – 71°35' в.д. По схеме районирования болотных систем [18] территория парка относится к Сургутско-Полесскому округу северотаежных олиготрофных озерково-грядово-мочажинных и сосново-кустарничково-сфагново-лишайниковых болот. Болота занимают примерно 2\3 территории парка «Нумто» [28]. Особенностью ландшафтов парка является широкое распространение мерзлых плоскобугристых болот с ерничково-кустарничково-лишайниковой растительностью, своеобразного анклава тундровых экосистем в таежной зоне [5]. Мерзлые торфяники здесь находятся вблизи южной границы распространения. По краям мерзлых торфяников распространены немерзлые сосново-кустарничково-сфагновые болота с разреженным древостоем высотой до 4–6 м. Широко распространены олиготрофные грядово-мочажинные и грядово-озерковые болота, с кустарничково-лишайниковыми сообществами с сосной на грядах и осоково-пушицево-сфагновыми в мочажинах. Мезотрофные осоково-моховые болота приурочены к приречным участкам.

Объектами исследования были торфяники, различающиеся по морфологии, растительному покрову и глубине сезонного протаивания. Исследован состав торфа трех разрезов, расположенных в различных участках парка (рис. 1). Разрез 1 сделан на крупнобугристом торфянике (63°52'50" с.ш., 70°16'50" в.д.), разрез 2 (63°42'20" с.ш., 70°24'04" в.д.) – на отдельно стоящем бугре пучения, разрез 3 (63°30'06" с.ш., 71°22'14" в.д.) – в краевой части плоскобугристого торфяника. Все торфяники распложены на многолетнемерзлых породах. Минеральные породы, подстилающие торф, представлены льдистыми и сильно льдистыми песками и супесями. Сезонное оттаивание варьировало от 1,1 м (плоскобугристый торфяник) до 2 м (бугор пучения). Разрез 1 почти полностью сложен сфагновым торфом, только в самых нижних слоях сменяющийся осоковым. Разрез 2 – сложен верховыми торфами, в верхней части разреза преимущественно кустарничковый торф (багульник, брусника), в нижней – сфагновый (*Sphagnum fuscum*, *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum angustifolium*). Ботанический анализ торфа разреза 3 показал, что доля пушиц (*Eriophorum spp.*) в основной части разреза составляет от 73% до 96%. В самых верхних слоях доля пушицы уменьшается до 42%, остальное количество остатков представлено сфагновыми и гипновыми мхами, клюквой. Таким образом, торф относится к пушицевому виду, в ботаническом составе которого содержится от 40 до 100% остатков пушицы и не более 35% сфагновых мхов.

Типологическая принадлежность олиготрофных торфяных почв парка является предметом дискуссии. Ранее почвы мерзлых бугров на территории парка Нумто по диагностическим критериям Классификации почв России [31] были отнесены к подтипу деструктивных типа торфяных олиготрофных, а в случае разрушения бугров предложено выделить торфяные олиготрофные реликтивно-эвтрофные почвы [1]. Однако проявляющееся в отдельных случаях несоответствие состава торфа и строения залежи описанным в «Классификации...» критериям деструктивных олиготрофных почв вызвало предложение выделить особый подтип влажных регрессивных почв [2]. Обследованные

нами разрезы по совокупности признаков были отнесены к олиготрофным (разрез 1), олиготрофным деструктивным (разрез 2). Почвы разреза 3, где олиготрофный торф составляет основную часть залежи было принято отнести в соответствии с [1] к олиготрофным реликтивно-эутрофным.

В ходе исследования с помощью пробоотборника прямоугольного сечения был отобран керн торфа на всю глубину разреза до минеральной основы. Общая мощность торфа в разрезе 1 составляет 100 см, в разрезе 2 – 162 см, разрезе 3 – 97 см. Для изучения распределения химических элементов в профиле торфяника керн был поделен на равные отрезки, которые были высушены при комнатной температуре до воздушно-сухого веса.



Рис. 1. Район исследования. Разрез 1 – крупнобугристое болото на родовых угодьях С.Д. Рандымова. Разрез 2 – бугор пучения, лицензионный участок имени Логачева. Разрез 3 – краевая часть плоскобугристого торфяника

Элементный состав образцов был определен с применением методов масс-спектральной и атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP–MS и ICP–OES). Для каждой пробы проведено два параллельных определения элементов. Результаты, полученные в двух повторениях, проверялись на предмет расхождений с допусками ($P=0,95$), рассчитанными для каждого измеряемого элемента отдельно. При удовлетворительном результате в качестве конечного результата измерения принималось среднее арифметическое. Зольность торфа определяли согласно ГОСТ 26801-86 [9]. Тигли с навесками, высушенные при температуре 105°C до постоянной массы, помещали в муфельную печь. Постепенно поднимали температуру печи до 800°C и прокаливали в течение двух часов. После охлаждения тигли взвешивали.

Для полученных данных подсчитаны статистические показатели – среднеарифметическое значение (M), медианное значение (Me) и среднеквадратичное отклонение (SD). Обработка проводилась с помощью программы Microsoft Excel. Для утонения особенностей распределения химических элементов в профиле торфяника были подсчитаны коэффициенты радиальной дифференциации. Биогеохимические особенности торфа обследованной территории оценивались путем сопоставления с результатами изучения состава торфов сопредельных территорий: Надым-Пур-Тазовского междуречья [26], Среднего Приобья [7], Томской области [11], бассейна р. Пякупур [17] и верховых торфов России [10].

Результаты и их обсуждение. Средняя зольность торфа составила в разрезе 1 – 3,1% (варьирование 2,1 – 3,6%), в разрезе 2 – 6,5 % (4,5 – 9,1%), в разрезе 3 – 2,9% (1,5-3,5%). Низкая зольность связана как со слабой степенью разложения торфа, так и с незначительным поступлением пылевых частиц в торфяник в ходе его формирования. Результаты определения элементного состава торфов представлены в таблице. Сопоставление с показателями регионального фона показало, что торф на обследованной территории отличается низким содержанием большинства микро- и макроэлементов. Во всех обследованных торфах содержание Cr, Co, Ni, Pb, Cu, Cd было ниже средних значений для торфяных почв Надым-Пур-Тазовского региона [26]. Пониженные концентрации ряда других микроэлементов (Fe, Sc, V, Mn, Co) отмечены в сфагновом и пушицевом торфе (табл. 1). В сходных по морфологии торфяниках бассейна реки Пякупур [17] были выявлены еще более низкие концентрации Fe, Co, Ni, V, Mo.

Таблица

Элементный состав торфов «Природного парка «Нумто»

Элементы, мг/кг абс. сухого в-ва	Разрез 1. Сфагновый олиготрофный торф (n=40)		Разрез 2. Верховые (кустарничковый и сфагновый) торфа (n=47)		Разрез 3. Пушицевый торф (n=20)		Региональный фон для торфяников [17; 26]
	$M \pm sd$	Me	$M \pm sd$	Me	$M \pm sd$	Me	
Al	2943 $\pm$ 2959	2096	2690 $\pm$ 1729	1927	1406 $\pm$ 410	1303	1487 $\pm$ 1060*
Fe	2055 $\pm$ 930	1758	8678 $\pm$ 3620	9985	1371 $\pm$ 1163	708	4890 $\pm$ 700 **
Li	0,5 $\pm$ 1,2	0,14	0,74 $\pm$ 0,69	0,36	0,32 $\pm$ 0,11	0,29	0,48 $\pm$ 0,31 *
Be	0,17 $\pm$ 0,07	0,16	0,14 $\pm$ 0,09	0,13	0,14 $\pm$ 0,04	0,15	-
Sc	0,72 $\pm$ 0,51	0,57	1,1 $\pm$ 0,77	0,75	0,81 $\pm$ 0,25	0,87	0,90 $\pm$ 0,16 **
Ti	75 $\pm$ 151	38	77 $\pm$ 58	52	125 $\pm$ 40,6	115	94 $\pm$ 93*
V	5,3 $\pm$ 8,5	3,0	11 $\pm$ 8,3	11	6,9 $\pm$ 1,9	6,8	7,84 $\pm$ 0,95 **
Cr	3,9 $\pm$ 4,1	2,5	6,3 $\pm$ 4,2	4,7	4,6 $\pm$ 1,3	4,5	7,92 $\pm$ 0,92**
Mn	12 $\pm$ 10,1	7,7	88 $\pm$ 84	51	13,8 $\pm$ 8,3	14,7	49 $\pm$ 9**
Co	0,94 $\pm$ 0,67	0,68	2,1 $\pm$ 0,85	2,4	0,63 $\pm$ 0,14	0,62	2,07 $\pm$ 0,16**
Ni	5,6 $\pm$ 1,2	2,5	4,2 $\pm$ 2,7	4,1	1,3 $\pm$ 0,3	1,3	6,34 $\pm$ 0,50**
Cu	1,7 $\pm$ 0,92	1,4	3,2 $\pm$ 1,6	2,7	2,67 $\pm$ 1,6	2,3	6,24 $\pm$ 0,58**
As	0,57 $\pm$ 0,34	0,50	3,8 $\pm$ 1,4	3,8	-	-	0,11 $\pm$ 0,07*
Sr	21 $\pm$ 12,9	18	21 $\pm$ 11	24	13,8 $\pm$ 6,4	12,0	20,5 $\pm$ 0,2**
Y	2,6 $\pm$ 1,0	2,4	3,5 $\pm$ 2,7	2,6	2,13 $\pm$ 0,72	2,24	-
Mo	0,14 $\pm$ 0,06	0,10	0,20 $\pm$ 0,10	0,19	0,51 $\pm$ 0,44	0,40	0,12 $\pm$ 0,05*

Cd	0,14±0,10	0,11	0,11±0,07	0,09	-	-	0,25±0,024**
Cs	0,14±0,19	0,10	0,21±0,17	0,10	-	-	-
Ba	30±28	24	60±22	64	81,1±21.9	75,1	65,1±5,2**
La	1,8±0,96	1,4	2,9±2,0	2.2	1,73±0.54	1,66	-
Pb	2,9±3,5	1,5	1,6±1,4	1.2	1,43±1.5	0,95	4,93±0,45*8

Примечание: М – среднее арифметическое значение; sd – среднеквадратичное отклонение;

Me – медиана. * – [17]; ** – [26]

Ранее указывалось, что торф таежных районов Среднего Приобья представляет собой сильную отрицательную геохимическую аномалию многих химических элементов вследствие удаленности от источников аэрального переноса пыли [7]. Очевидно, что и в более северных районах торф также отличается низкими концентрациями элементов. В торфяниках Надым-Пур-Тазовского междуречья концентрация Ba, Mn, Sc, Sr и Pb в 3–5 раз, Zn, Co, Со и Cr в 2–3 раза ниже, чем в органогенных горизонтах минеральных почв [26]. Таким образом, оттаивание мерзлых торфяников представляет значительно меньшую угрозу трансформации биогеохимических потоков веществ, чем оттаивание минеральных почв.

Сравнение с результатами обобщения элементного состава верховых торфов России, полученных преимущественно на Восточно-Европейской равнине [10], позволило уточнить некоторые биогеохимические особенности торфов таежной зоны Западной Сибири. Торфа парка «Нумто» содержат повышенное количество железа, хрома и марганца (рис. 2). Высокое содержание этих элементов ранее отмечалось в торфах разных природных зон Западной Сибири [19]. В торфах Томской области также было выявлено высокое содержание Fe [11], марганца и хрома [13]. Таким образом, состав торфа на обследованном участке типичен для таежной зоны Западной Сибири, к биогеохимическим особенностям которой относится накопление Fe, Mn, Cr в торфе верховых болот.

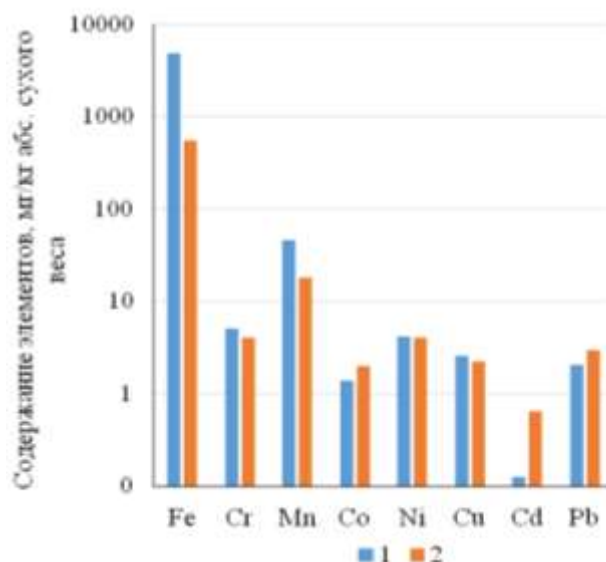


Рис. 2. Элементный состав верховых торфов. 1 – «Природный парк «Нумто» (наши данные); 2 – верховые торфа России [10]

Вместе с тем содержание кадмия и свинца в исследованном торфе было на низком уровне. Свинец в исследуемых торфах аккумулируется в незначительных количествах: В исследованных разрезах его концентрация в 1,2–3,1 раз меньше средних значений для севера Западной Сибири по [26], содержание Cd меньше в 1,8–2,3 раза. Эти элементы традиционно считаются индикаторами антропогенного воздействия, обусловленного транспортной нагрузкой (Pb), цветной металлургией (Cd) [32]. Низкое содержание элементов в исследованных торфах можно объяснить их слабым поступлением от антропогенных источников вследствие удаленности от промышленных центров и в целом от крупных поселений.

Сопоставление состава торфов разного ботанического состава показывает значительное варьирование содержания ряда элементов. В верховых торфах бугра пучения отмечено повышенное содержание Fe, V, Mn, Mo, в пушицевом торфе – Ba.

На формирование состава торфа оказывают влияние процессы биологического накопления растениями-доминантами, особенности водомиграционной активности элементов в болотных водах, поступление почвенного мелкозема и аэрозолей воздушным путем [22]. Сфагновые мхи являются одним из основных торфообразователей верховых болот. Отмечалось, что биогеохимическая активность, то есть способность к накоплению элементов у сфагновых мхов ниже, чем у растений плакорных местообитаний [20]. Однако отдельные элементы интенсивно поглощаются сфагновыми мхами, в том числе марганец [19]. Накопление бария и марганца пушицей было отмечено в Уренгойских тундрах [21]. В этом отношении высокое содержание Ba в торфе разреза 3 можно объяснить особенностями его биологического накопления пушицей. Однако повышенное содержание Mn в сфагновых мхах не соответствует низкому содержанию в сфагновом торфе разреза 1. В составе растений этот элемент находится в легко растворимой форме и быстро освобождается из разлагающихся растительных остатков [24]. Следовательно, содержание Mn и его распределение в профиле торфяника зависит не от состава растений-торфообразователей, а от процессов транслокации и закрепления этого элемента на геохимических барьерах.

Наибольшая концентрация многих элементов (Mn, Fe, Li, Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu, Y) отмечена в торфах бугра пучения (табл.). Рост содержания микроэлементов совпадает с ростом зольности торфа. Зольность торфа разреза 2 была максимальной, что, по нашему мнению, связано с усилением осаждения эолового материала на бугре пучения. Однако сопряженный анализ ботанического и элементного состав торфа (рис. 3, 4) показал, что увеличение содержания Pb, Cu, Cd совпадает со сменой состава торфа со сфагнового на кустарничковый (*Ericaceae*). Другие элементы по профилю распространены относительно равномерно. Таким образом, распределение Pb, Cu, Cd зависит преимущественно от биологического накопления. Ранее отмечалось, что багульник в районе Уренгоя интенсивно накапливает халькофильные элементы (Cu, Pb, Cd), в то время как содержание сидерофильных Fe, Co, Cr в нем понижено [21]. Согласно литературным данным [25], в

почве катионы халькофильных элементов (кадмия, свинца, меди) взаимодействуют с органическими и минеральными соединениями. Гуминовые и фульвокислоты способны образовывать устойчивые комплексы с ними, поэтому торф обладает способностью к прочной фиксации этих элементов.

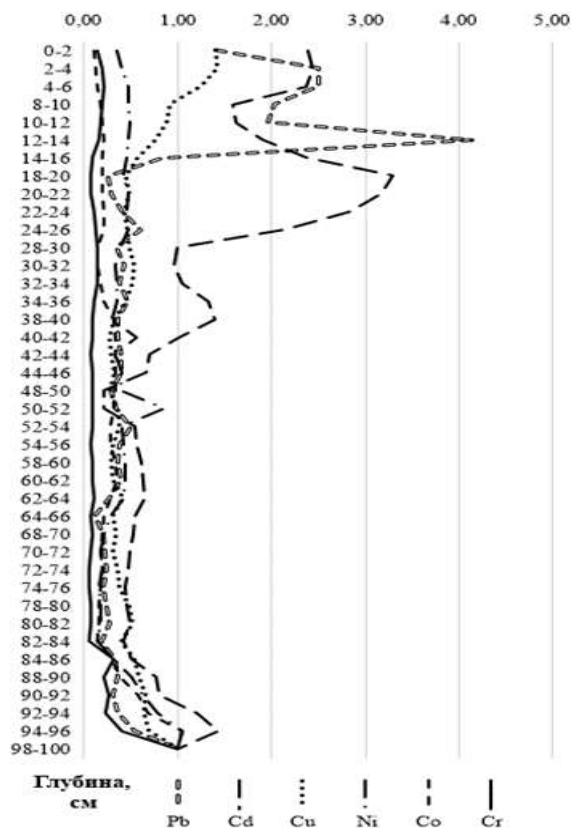


Рис. 3. Распределение микроэлементов в профиле разреза 2

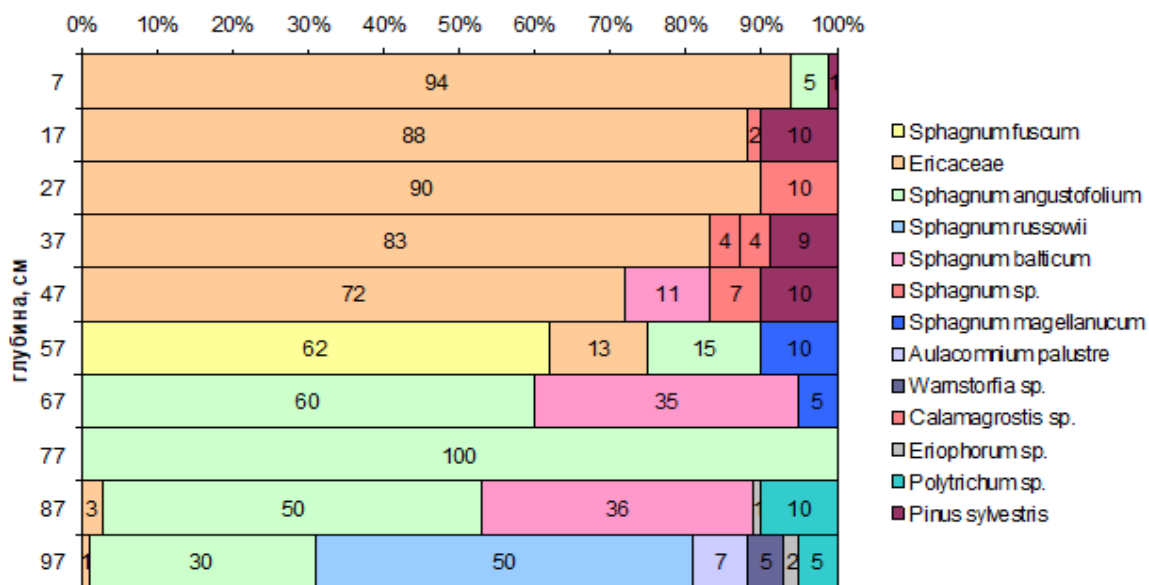


Рис. 4. Ботанический состав торфа разреза 2

Таким образом, повышенное содержание халькофильных элементов в комплексном торфе разреза 2 мы связываем с изменением ботанического состава торфообразователей, а рост содержания литофильных и сидерофильных элементов – поступлением эолового мелкозема.

Для прогноза изменения потоков вещества, вызванного таянием мерзлых торфяников, было проведено сопоставление состава их торфа с составом почвообразующих пород. Результаты, приведенные на рисунке 5, показывают содержание большинства тяжелых металлов в торфе меньше, чем в породах. Торфа имеют более низкий объемный вес, поэтому запасы элементов в них ниже, чем в минеральных почвах. Однако торф отличается повышенным содержанием Cd. Таким образом, возможное таяние мерзлых торфяников с последующим высвобождением содержащихся в них элементов может привести к увеличению поступления этого элемента в поверхностные воды.

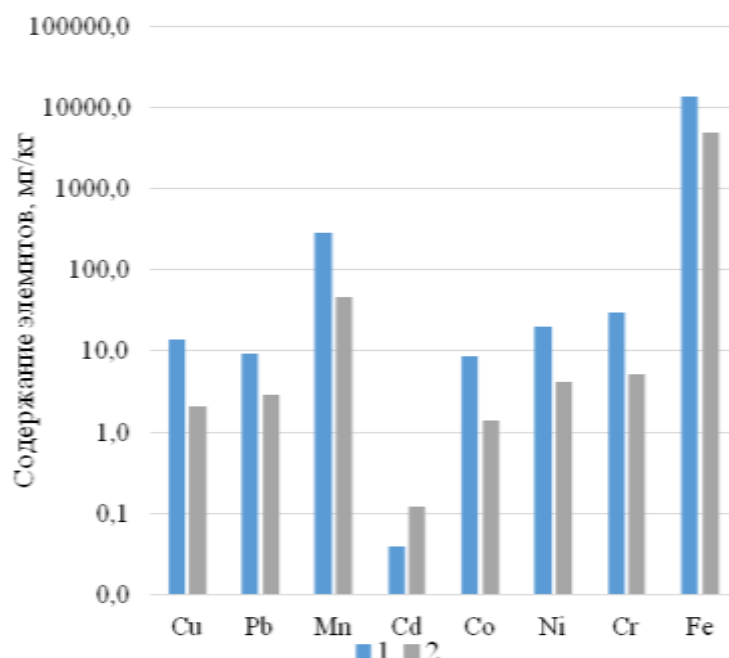


Рис. 5. Содержание 1 – тяжелых металлов в почвообразующих породах «Природного парка «Нумто» [5] и 2 – в торфе (наши данные)

Выводы. Верховой торф на обследованной территории отличается повышенным содержанием Fe, Mn, Cr. Данная биогеохимическая особенность свойственна торфам различных природных зон Западной Сибири. Концентрация тяжелых металлов, традиционно рассматриваемых в качестве индикаторов техногенного загрязнения (Cd, Pb, Cr, Ni, Cu) в торфе природного парка «Нумто» низкая вследствие удаленности от источников техногенеза.

Содержание халькофильных элементов (Pb, Cu, Cd) в торфе зависит, прежде всего, от биологического накопления растениями-торфообразователями. Кустарнички, в частности, багульник, интенсивно накапливают эти элементы, поэтому кустарничковый торф в верхней части разреза содержит этих элементов больше, чем сфагновый и пушицевый торф.

Мп интенсивно накапливается растениями, но столь же интенсивно вымывается из растительных остатков. Содержание литофильных и сидерофильных элементов Fe зависит от осаждения пылевых частиц, которое максимально на крупных буграх пучения.

По сравнению с почвообразующими породами в районе исследований, торф содержит повышенное количество кадмия, поэтому оттаивание мерзлого торфа при потеплении климата может вызвать рост поступления этого элемента в поверхностные воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№FWRZ-2021-0006).

Литература

1. Аветов Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконокова Е.А. Опыт использования классификации и диагностики почв России в систематике торфяных почв биогеоценозов олиготрофных болот северотаежной подзоны Западной Сибири // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 4. С. 37-47.
2. Аветов Н.А., Шишконокова Е.А. Некоторые аспекты систематики и диагностики торфяных почв бореальных болот // Почвоведение. 2019. № 8. С. 901-909. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080033>
3. Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таежной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Гидрогеология. 2013. № 323(1). С. 173-178.
4. Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение марганца в торфяных залежах. Томской области Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. 2015. № 326(7). С. 27-35.
5. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка «Нумто». Новосибирск: Наука, 2008. 280 с.
6. Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконокова Е.А. Содержание химических элементов в торфяных почвах, засоленных буровыми сточными водами на участке добычи нефти в Среднем Приобье // Агрохимия. 2013. № 3. С. 75-84. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13100146>
7. Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Аветов Н.А., Трофимов С.Я., Козлов С.А. Сильная отрицательная геохимическая аномалия в верховых торфах средней тайги Среднего Приобья // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, 2012. № 3. С. 7-12
8. Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконокова Е.А. Металлы в загрязненном нефтью торфе (Западная Сибирь) // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 67. 2011. С. 67-79.
9. ГОСТ 26801-86. Торф. Методы определения зольности в залежи.
10. Добродеев О.П. Особенности биогеохимии тяжелых металлов верховых болот // Природные и антропогенно измененные биогеохимические циклы: Труды Биогеохимической лаборатории. М.: Наука, 1990. Т. 21. С. 53-61.

11. Езупенок Е.Э. Содержание химических элементов в торфах и торфяных почвах южно-таежной подзоны Западной Сибири. Автореф. дис. канд. биол. наук. Томск, 2005.
12. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Куценогий К.П. Биогеохимия Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U в низинном торфе на междуречье Оби и Томи // Почвоведение. 2003. № 5. С. 557-567.
13. Инишева Л.И., Цыбукова Т.Н. Распределение химических элементов в низинных торфах пойменного типа // Торф в сельском хозяйстве. 1997. Вып. 3. С. 32-40.
14. Инишева Л.И., Цыбукова Т. Н. Эколого-геохимическая оценка торфов юго-востока Западно-Сибирской равнины // География и природ. ресурсы. 1999. № 1. С. 45-51.
15. Кирпотин С.Н., Воробьев С.Н., Хмыз В.Ф., Гузынин Т.В., Скобликов С.А., Яковлев А.Е. Строение и динамика растительного покрова плоскобугристых болот Надым-Пурского междуречья Западно-Сибирской равнины // Ботанический журнал. 1995. Т. 80, № 8. С. 29-38.
16. Ларина Н.С., Ларин С.И., Меркушина Г.А. Накопление химических элементов в верховых торфяниках подтаежного Зауралья в голоцене // Почвоведение. 2014. №7. С. 812-823. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14050128>
17. Лим А.Г., Лойко С.В., Раудина Т.В., Волкова И.И., Середина В.П. Элементный состав торфяной залежи плоскобугристого мерзлого болота бассейна реки Пякупур (северная тайга Западной Сибири) // Ukrainian Journal of Ecology. 2018. Т.8. № 1. С. 79-87.
18. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А. Болотные системы Западной Сибири и их природное значение. Тула, 2001. 584 с.
19. Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63-70.
20. Московченко Д.В. Биогеохимические особенности ландшафтов полуострова Ямал и их оптимизация в связи с нефтегазодобычей. Автореф. дис. канд. геогр. наук. Санкт-Петербург, 1995. С. 19.
21. Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В. Элементный состав растений Уренгойских тундр // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 130-136.
22. Московченко Д.В., Романенко Е.А. Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 51-84. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-51-84>
23. Нечаева Е. Г. Геохимические закономерности торфообразования на Западно-Сибирской равнине // География и природ. ресурсы. 1992. № 3. С. 21-29.
24. Нечаева Е.Г. Ландшафтно-геохимический анализ динамики таёжных геосистем. Иркутск: Институт географии СО АН СССР, 1985. 210 с.
25. Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение / под общ. ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 289 с.
26. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422-439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>

27. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Тигеев А.А. Элементный состав торфяных отложений верхового типа Пур-Тазовского междуречья // Географический вестник. № 1(52). 2020. С. 154-162. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-154-165>
28. Шалатонов Е.Н., Московченко Д.В. Типология и динамика болотных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях воздействия нефтегазового комплекса (на примере природного парка «Нумто») // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14. № 6. С. 933-943.
29. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Толпышева Т.Ю., Тарлинская А.А. Растительная индикация термокарстовых образований бугристых болот в южной части парка Нумто (Западная Сибирь) // Социально-экологические технологии. 2019. Т. 9. № 1. С. 27-56. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2019-9-1-27-57>
30. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Толпышева Т.Ю. Торфяные почвы бореальных регрессивных болот Западной Сибири: проблемы биологической диагностики и систематики // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. № 84. С. 61-74. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-61-74>
31. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
32. Nriagu J. O., Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals // Nature. 1988. No 333. Pp. 134-139. <https://doi.org/10.1038/333134a0>
33. Raudina T. V. Loiko S. V. , Lim, A. G. , Krickov I. V. , Shirokova L. S. and Istigechev G. I. and Kuzmina D. M. and Kulizhsky, S. P. and Vorobyev S. N. and Pokrovsky O. S. Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat porewater of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia // Biogeosciences. No 14. 2017. Pp. 3561-3584. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3561-2017>
34. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. Permafr Periglac Proc. 2007. V. 18. No 1. Pp. 7-19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
35. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // Ecol. Eng. № 80, 2015. Pp. 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.02.001>

References

1. Avetov, N.A., Kuznetsov, O.L., & Shishkonakova, E.A. (2019). Experience in the use of Russian soil classification and diagnosis in the systematics of peat soils of oligotrophic bogs in the north taiga subzone of West Siberia. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 19(4), 37-47. (in Russ.).
2. Avetov, N.A., & Shishkonakova, E.A. (2019). Some aspects of the systematics and diagnostics of peat soils of boreal swamps. *Soil science*, 8, 901-909. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080033> (in Russ.).
3. Arkhipov, V.S., & Bernatoni, V.K. (2013). Distribution of calcium and iron in the vertical profile of peat deposits of the taiga zone of Western Siberia. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Hydrogeology*, 323(1), 173-178. (in Russ.).

4. Arkhipov, V.S., & Bernatonis, V.K. (2015). Distribution of manganese in peat deposits. Tomsk region News of Tomsk Polytechnic University. *Georesource engineering*, 326(7), 27-35. (in Russ.).
5. Valeeva, E.I., Moskovenko, D.V., & Aref'ev, S.P. (2008). *The natural complex of the Numto Park*. Novosibirsk. (in Russ.).
6. Vodyanitskij, Yu.N., Avetov, N.A., Savichev, A.T., Trofimov, S.Ya., & Shishkonakova, E.A. (2013). The content of chemical elements in peat soils salted by drilling wastewater at the oil production site in the Middle Ob region. *Agrochemistry*, 3, 75-84. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X13100146>
7. Vodyanitskij, Yu.N., Savichev, A.T., Avetov, N.A., Trofimov, S.Ya., & Kozlov, S.A. (2012). A strong negative geochemical anomaly in the upper peat of the middle taiga of the Middle Ob region. *Bulletin of the Moscow University*, 17(3), 7-12. (in Russ.).
8. Vodyanitskij, Yu.N., Savichev, A.T., Trofimov, S.Ya., & Shishkonakova, E.A. (2011). Metals in oil-contaminated peat (Western Siberia). *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, 67, 67-79. (in Russ.).
9. GOST 26801-86. *Peat. Methods for determining ash content in deposits*. (in Russ.)
10. Dobrodeev, O.P. (1990). Osobennosti biogeohimii tyazhelyh metallov verkhovyh bolot. Prirodnye i antropogenno izmenennye biogeohimicheskie cikly. In *Trudy Biogeohimicheskoy laboratorii* (Vol. XXI. pp. 53-61). M.: Nauka (in Russ.)
11. Ezupenok, E.E. (2005). *The content of chemical elements in peat and peat soils of the South Taiga subzone of Western Siberia*. Avtoref. kand. biol. nauk. Tomsk. (in Russ.).
12. Efremova, T.T., Efremov, S.P., & Kutsenogij, K.P. (2003). Biogeochemistry of Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U in lowland peat between the Ob and Tom rivers. *Soil Science*, 5, 557-567. (in Russ.).
13. Inisheva, L.I., & Tsybukova, T.N. (1997). Distribution of chemical elements in lowland peat of floodplain type. *Peat in agriculture*, 3, 32-40. (in Russ.).
14. Inisheva, L. I., & Tsybukova, T. N. (1999). Ecological and geochemical assessment of peat in the south-east of the West Siberian plain. *Geography and nature. Resources*, 1, 45-51. (in Russ.).
15. Kirpotin, S.N., Vorob'ev, S.N., KHmyz, V.F., Guzynin, T.V., Skoblikov, S.A., & Yakovlev, A.E. (1995). The structure and dynamics of vegetation cover of flat-hummocky swamps of the Nadym-Pursky interfluvium of the West Siberian plain. *Botanical Journal*, 80(8), 29-38. (in Russ.).
16. Larina, N.S., Larin, S.I., & Merkushina, G.A. (2014). Accumulation of chemical elements in the upper peatlands of the Subtaiga Trans-Urals in the Holocene. *Soil Science*, 7, 812-823. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14050128> (in Russ.).
17. Lim, A.G., Lojko, S.V., Raudina, T.V., Volkova, I.I., & Seredina, V.P. (2018). Elemental composition of a peat deposit of a flat-hummocky frozen swamp of the Pyakupur River basin (northern taiga of Western Siberia). *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 79-87. (in Russ.).
18. Liss, O.L., Abramova, L.I., Avetov, N.A., & Berezina, N.A. (2001). *Swamp systems of Western Siberia and their natural significance*. Tula. (in Russ.).

19. Moskovchenko, D.V. (2006). Biogeochemical features of the upper marshes of Western Siberia. *Geography and natural Resources*, 1, 63-70 (in Russ.)
20. Moskovchenko, D.V. (1995). *Biogeochemical features of the Yamal Peninsula landscapes and their optimization in connection with oil and gas production*. Avtoref. kand. geogr. nauk. Sankt-Peterburg. (in Russ.).
21. Moskovchenko, D.V., Moiseeva, I.N., & KHozyainova, N.V. (2012). The elemental composition of plants of the Urengoy tundras. *Bulletin of Ecology, forestry and landscape studies*, 12, 130-136. (in Russ.).
22. Moskovchenko, D.V., & Romanenko, E.A. (2020). Features of the elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluvium. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, 103, 51-84. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-51-84> (in Russ.).
23. Nechaeva, E.G. (1992). Geochemical patterns of peat formation in the West Siberian plain. *Geography and nature. Resources*, 3, 21-29. (in Russ.).
24. Nechaeva, E.G. (1985). *Landscape-geochemical analysis of the dynamics of taiga geosystems*. Irkutsk. (in Russ.).
25. Ovcharenko, M.M. (Ed.). (1997). *Heavy metals in the soil-plant-fertilizer system*. M.: Proletarskiy Svetotch. (in Russ.).
26. Opekunova, M.G., Opekunov, A.Yu., Kukushkin, C.Yu., & Ganul, A.G. (2019). Background content of chemical elements in soils and bottom sediments of the north of Western Siberia. *Soil Science*, 4, 422-439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114> Sankt-Peterburg (in Russ.).
27. Pozhitkov, R.Yu., Moskovchenko, D.V., & Tigeev, A.A. (2020). The elemental composition of peat deposits of the upper type of the Pur-Taz interfluvium. *Geographical Bulletin*, 1 (52), 154-162. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-154-165> (in Russ.).
28. Shalatonov, E.N., & Moskovchenko, D.V. (2007). Typology and dynamics of swamp ecosystems of the northern taiga of Western Siberia under the influence of the oil and gas complex (on the example of the Numto Natural Park). *Siberian Ecological Journal*, 14(6), 933-943. (in Russ.).
29. Shishkonakova, E.A., Avetov, N.A., Tolpysheva, T.Yu., & Tarlinskaya, A.A. (2019). Plant indication of thermokarst formations of bumpy swamps in the southern part of the Numto Park (Western Siberia). *Socio-ecological technologies*, 9(1), 27-56. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2019-9-1-27-57> (in Russ.).
30. Shishkonakova, E.A., Avetov, N.A., & Tolpysheva, T.Yu. (2016). Peat soils of boreal regressive swamps of Western Siberia: problems of biological diagnostics and systematics. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, 84, 61-74. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-61-74> (in Russ.).
31. Shishov, L.L., Tonkonogov, V.D., Lebedeva, I.I., & Gerasimova, M.I. (2004). *Classification and diagnostics of soils in Russia*. Smolensk (in Russ.).
32. Nriagu, J.O., & Pacyna, J.M. (1988). Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 333, 134-139. <https://doi.org/10.1038/333134a0>

33. Raudina, T.V. Loiko, S.V. , Lim, A.G. , Krickov, I.V. , Shirokova, L.S. and Istigechev, G.I. and Kuzmina, D.M. and Kulizhsky, S.P. and Vorobyev, S.N. & Pokrovsky, O.S. (2017). Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat porewater of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia. *Biogeosciences*, 14, 3561-3584. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3561-2017>
34. Shur, Y.L., & Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafr Periglac Proc*, 18(1), 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
35. Veretennikova, E.E. (2015). Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecol. Eng.*, 80, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.02.001>

дата поступления: 25.02.2024

дата принятия: 27.04.2024

© Болдырева Е.А., Московченко Д.В., 2024

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОМОЖЖЕВЕЛОВЫХ ЛЕСОВ КРЫМА

О.О. Koren`kova

THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE BIOMETRIC CHARACTERISTICS OF HIGH JUNIPER FORESTS OF THE CRIMEA

Аннотация. Высокоможжевеловые леса являются важнейшим компонентом экологической устойчивости Крымского полуострова. Однако, в настоящее время площадь популяции *J. excelsa* в Крыму сокращается. В результате чего возникает угроза необратимого изменения облика полуострова в будущем. Целью проведенных исследований явилось определение биометрических характеристик высокоможжевеловых древостоев Крыма и особенностей влияния на них факторов окружающей среды. Исходя из цели работы, были поставлены следующие задачи: установить основные таксационные характеристики насаждений; выявить степень влияния абиотических и антропогенных факторов на изучаемые параметры. Согласно общепринятым в лесоводстве и геоботанике методикам, в пределах древостоев *J. excelsa* заложено 28 пробных площадей размером по 0,2 га на высоте от 40 до 1020 м н.у.м., в различных эдафо-орографических условиях. Посредством однофакторного дисперсионного анализа выявляли степень влияния абиотических и антропогенных факторов на биометрические характеристики высокоможжевеловых лесов Крыма. В результате проведенных исследований, установлено, что средний диаметр ствола древостоев *J. excelsa* – $27,1 \pm 1,3$ см (при минимальных и максимальных значениях в 11 и 41 см, соответственно). Среди факторов, оказывающих наибольшее влияние на диаметр стволов, можно выделить: эдафические условия и годовое количество осадков. Кроме того, выявлено, что деревья *J. excelsa* не достигают описанных в литературе высот, свойственных основной средиземноморской части ареала, что, в свою очередь, свидетельствует о неблагоприятных условиях существования вида на северной границе его распространения. В среднем, высота деревьев *J. excelsa* в Горном Крыму составляет $5,4 \pm 0,2$ м. Уникальным элементом крымской популяции *J. excelsa* выступают насаждения, произрастающие на г. Крестовая, их высота достигает 16 м, что в 3 раза

Abstract. High-juniper forests are a critical component of the sustainability of the Crimean Peninsula. However, the area visited by *J. excelsa* in Crimea is currently increasing. As a result, there is a threat of irreversible changes in the appearance of the peninsula in the future. As

a result of the research, the biometric characteristics of the high-juniper forests of the Crimea and the characteristics of the ancient environmental factors existing on them were determined. Based on the goals of the work, the following tasks were set: to establish the main taxation characteristics of hopes; the degree of influence of abiotic and anthropogenic factors according to the studied parameters. According to methods generally accepted in forestry and geobotany, 28 sample plots of 0.2 hectares in size were established within *J. excelsa* stands at an altitude of 40 to 1020 m above sea level, in various edapho-orographic conditions. Using one-way analysis of variance, the degree of biometric characteristics of abiotic and anthropogenic factors in the high-juniper forests of Crimea was revealed. As a result of the studies, it was established that the average diameter of *J. excelsa* stands is 27.1 ± 1.3 cm (with minimum and maximum values of 11 cm and 41 cm, respectively). Among the factors that have the greatest influence on trunk diameter are: edaphic conditions and regional growth. In addition, it was established that *J. excelsa* trees are not described in the alphabetical heights characteristic of the main ones among the Mediterranean part of the range, which, in turn, indicates stable conditions of existence on its northern border. On average, the height of *J. excelsa* individuals in the Crimean Mountains is 5.4 ± 0.2 m. A unique element of the Crimean culture, *J. excelsa* is being studied growing on the town of Krestovaya, their height reaches 16 m, which is

больше, чем средняя высота высокоможжевельниковых лесов Крыма.

Ключевые слова: высокоможжевельниковые леса; *J. excelsa*; таксационные показатели; абиотические факторы; Крым; гора Крестовая.

Сведения об авторе: Коренькова Олеся Олеговна, ORCID: 0000-0001-6482-7312, канд. биол. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, o.o.korenkova@mail.ru

3 times higher than the average height of the area.

Keywords: high-juniper forests; *J. excelsa*; taxation indicators; abiotic factors; the Crimea; Mount Krestovaya.

About the author: Olesya O. Koren`kova, ORCID: 0000-0001-6482-7312, Candidate of Biological Sciences, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, o.o.korenkova@mail.ru

Коренькова О.О. Особенности воздействия факторов окружающей среды на биометрические характеристики высокоможжевельниковых лесов Крыма // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 111-122. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/10>

Korenkova, O.O. (2024). The Impact of Environmental Factors on the Biometric Characteristics of High Juniper Forests of the Crimea. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 111-122. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/10>

Введение. Реликтовые высокоможжевельниковые леса Крыма играют важную роль в процессах формирования экологической устойчивости полуострова. Произрастая на сухих каменистых участках, мало пригодных для других древесных пород, насаждения можжевельника высокого (*Juniperus excelsa* М.-Bieb.) защищают эти места обитания от эрозии, способствуют сохранению и формированию напочвенного покрова, а также осуществляют водорегулирующую и средообразующую роль. Кроме того, высокоможжевельниковые древостои выполняют важную эстетическую и санитарно-гигиеническую функции. Последнее возможно благодаря выделению большого количества эфирных масел, обладающих антисептическими свойствами [10; 16; 21-23].

Однако, в настоящее время площадь популяции *J. excelsa* в Крыму сокращается. На основании чего вид был включен в Красные книги Республики Крым и города Севастополя. Среди основных причин, приведших к изменению площади высокоможжевельниковых лесов, исследователи выделяют снижение уровня естественного возобновления, поражение вредителями и болезнями, а также прямое уничтожение в результате антропогенной деятельности [5; 6]. При этом, комплексных исследований высокоможжевельниковых древостоев и определения их качественных характеристик практически не проводилось.

Важная роль древостоев *J. excelsa* в экологическом балансе Крыма, позволяет предположить, что значительное сокращение их площади может в ближайшем будущем привести к необратимым последствиям и изменению облика полуострова. В результате чего, возникает острая необходимость в оценке текущего состояния популяции *J. excelsa* [12; 18].

Целью проведенных исследований явилось определение биометрических характеристик высокоможжевельниковых древостоев Крыма и особенностей влияния на них

факторов окружающей среды. Исходя из цели работы, были поставлены следующие задачи: установить основные таксационных характеристики насаждений; выявить степень влияния абиотических и антропогенных факторов на изучаемые параметры.

Материалы и методы исследования. Определение биометрических характеристик насаждений *J. excelsa* проводили на 28 пробных площадях, закладку которых осуществляли по общепринятым в лесоводстве и геоботанике методикам, размером по 0,2 га [8; 9]. Закладывали пробные площади в природных популяциях на высоте от 40 до 1020 м н.у.м., в различных эдафо-орографических условиях (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения пробных площадей в популяциях *J. excelsa* в Горном Крыму (1–2 – окрестности г. Инкерман; 3 – г. Чирка-Каясы; 4 – г. Каяташ; 5 – г. Кучук-Коль-Бурун; 6 – окрестности с. Широкое; 7 – г. Самналых; 8–9 – г. Курт-Кая; 10–12 г. Кара-Даг; 13 – г. Толака-Баир; 14 – г. Тарпан-Баир; 15 – ур. Батилиман; 16 – г. Сарыч; 17 – г. Дракон; 18 – г. Кошка; 19 – г. Крестовая; 20 – окрестности пгт. Массандра; 21 – м. Мартъян; 22 – б. Семидворская; 23 – г. Япул-Бурун; 24 – г. Папая-Кая; 25–26 – г. Коба-Кая; 27 – г. Сокол; 28 – г. Каршитерс)

Диаметр ствола измеряли мерной вилкой на высоте 1,3 м от корневой шейки. Шаг ступеней толщины принимали в 4 см. Также подсчитывали 2 средних диаметра древостоя: средневзвешенный через площадь сечения и средний арифметический. Высоту деревьев в насаждениях определяли с помощью высотомера Suunto PM-5. С помощью формулы Лоренца подсчитывали среднюю высоту древостоя [15].

Для оценки влияния погодных условий на развитие древостоев *J. excelsa*, пробные площади были разделены на три географических группы: западную, южнобережную и восточную. В западную группу вошли пробные площади № 1–14; в южнобережную – № 15–23, а в восточную – № 24–28. Для западной группы использовали данные осадков метеорологической станции № 33991 (Севастополь); для восточной и южнобережной групп

– № 33976 (Феодосия) и № 33990 (Ялта) соответственно. Для выделенных групп подсчитывалось годовое количество осадков [13]. Кроме годового количества осадков, выделенные регионы характеризуются различными типами почв. Западная часть Главной гряды крымских гор отличается бурыми горно-лесными почвами. В восточной и южной частях преобладают коричневые горно-щебнистые почвы [10; 12].

Кроме того, пробные площади объединяли в группы в зависимости от экспозиции склона. Всего было выделено 6 экспозиций: северо-восточная (ПП № 10 и № 24); восточная (ПП № 11, № 12 и № 25); юго-восточная (ПП № 5, № 17, № 22, № 23 и № 27); южная (ПП № 1, № 3, № 4, № 7, № 15 и № 21); юго-западная (ПП № 8, № 9, № 14, № 16, № 19 и № 20); западная (ПП № 2, № 6, № 13, № 18, № 26, № 28).

Эдафический фактор определялся по уровню плодородия почвы и ее увлажненности [14]. По методике П.С. Погребняка (1968) устанавливали типы условий местопроизрастания (эдафические условия) [14]. Всего на территории произрастания *J. excelsa* в Горном Крыму выделено 4 типа леса. Пробные площади группировали согласно типам леса, к которым они относятся: сухой можжевельновый бор (ПП № 3, № 20 и № 23), очень сухая можжевельная суборь (ПП № 6, № 10–12, № 14, № 22 и № 25–26), сухая можжевельная суборь (ПП № 4–9, № 13, № 18, № 24), сухой можжевельный сугрудок (ПП № 1–2, № 15–17, № 19, № 21, № 27, № 28).

Степень антропогенной нагрузки определялась по 5-бальной шкале путем оценки рекреационной дигрессии, согласно которой 1 балл – деятельность человека не внесла в лесной комплекс никаких заметных изменений; 2 балла – рекреационное воздействие человека выражается в установлении редкой сети тропинок (не более 5% исследуемой площади); 3 балла – тропиночная сеть сравнительно густа (занимает 10–15% всей площади); 4 балла – густая тропиночная сеть (занимают 20–30% площади); 5 баллов – тропиночная сеть очень густая (ее площадь увеличивается до 60–100% территории) [2]. Полученные результаты обрабатывали методами вариационной статистики [7].

Результаты и обсуждение. При определении среднего взвешенного через площадь сечения диаметра древостоев установлено, что данный показатель в популяции *J. excelsa* варьирует достаточно широко в пределах от 11 см (б. Семидворская) до 41 см (ур. Батилиман) (табл.). Коэффициент вариации 26,2%. В целом, для *J. excelsa* в Горном Крыму этот показатель равен 27 см.

В первую очередь диаметр стволов *J. excelsa* в Горном Крыму отражает возраст насаждений. Максимальным средним диаметром ствола характеризуются насаждения, произрастающие на территории урочища Батилиман, входящего в состав Государственного природного ландшафтного заказника регионального значения «Мыс Айя» (создан в 1974 году) [11]. Отдельные деревья здесь достигают 102 см в диаметре. При этом жизненное состояние таких деревьев оценивается как удовлетворительное. Регенеративные функции у них сохраняются на незначительном уровне (образуют единичные шишкоягоды и микростробилы).

Таблица

Биометрические характеристики высокоможевеловых лесов Крыма

№ ПП	D ₁ , см	D ₂ , см		H, м	
		M±m	V	M±m	V
1	24	17,4±1,9	66,5	4,4±0,3	28,7
2	31	26,6±2,7	51,6	4,8±0,2	24,3
3	27	25,1±4,1	44,8	3,8±0,2	16,7
4	18	15,1±1,1	48,5	4,3±0,2	36,7
5	26	21,6±1,5	59,3	4,7±0,1	25,8
6	24	18,2±1,5	45,4	3,8±0,1	34,3
7	25	18,7±1,3	61,1	3,7±0,2	34,9
8	28	20,9±2,0	57,0	4,6±0,2	38,5
9	27	16,2±2,1	72,9	4,3±0,2	28,4
10	31	25,0±1,7	43,8	4,6±0,2	39,7
11	32	26,6±1,9	53,1	5,0±0,2	29,9
12	39	30,6±2,6	44,0	4,7±0,2	25,8
13	22	17,2±1,6	53,0	4,6±0,2	26,7
14	25	20,9±2,2	40,0	3,8±0,2	27,8
15	41	30,8±2,8	64,3	5,7±0,3	32,9
16	30	22,6±1,6	58,7	4,9±0,2	30,6
17	24	18,4±1,7	47,5	5,0±0,3	32,8
18	34	27,5±1,9	59,1	5,5±0,2	23,9
19	33	28,1±1,1	38,9	7,6±0,2	34,6
20	17	13,0±0,9	51,3	3,3±0,1	24,4
21	28	22,1±1,6	55,8	5,4±0,2	30,8
22	11	9,2±0,5	49,7	3,2±0,1	34,2
23	23	15,8±1,7	76,7	3,5±0,2	32,9
24	20	14,4±1,3	63,8	3,4±0,3	35,5
25	40	31,4±2,7	63,3	3,5±0,2	39,4
26	34	26,0±2,4	64,4	2,8±0,2	34,9
27	26	18,7±1,6	67,2	3,6±0,1	32,7
28	17	13,7±1,3	58,9	3,6±0,2	33,0

Примечание: D₁ – средневзвешенный через площадь сечения диаметр ствола; D₂ – средний арифметический диаметр ствола; H – высота деревьев.

В ходе проведенного однофакторного дифференциального анализа установлено, что степень влияния внешних факторов среды на развитие деревьев *J. excelsa* практически такая же, как и на особи *J. deltoides* [4]. Максимальное воздействие на диаметр ствола оказывают эдафические условия мест произрастания (степень влияния фактора составляет 4,52 %) (рис. 2). В условиях сухого бора рост деревьев замедляется и диаметр их ствола в среднем составляет 15,00±1,43 см. Тогда как в условиях сухой субори этот показатель в 1,57 раза выше – 23,56±1,97 см.

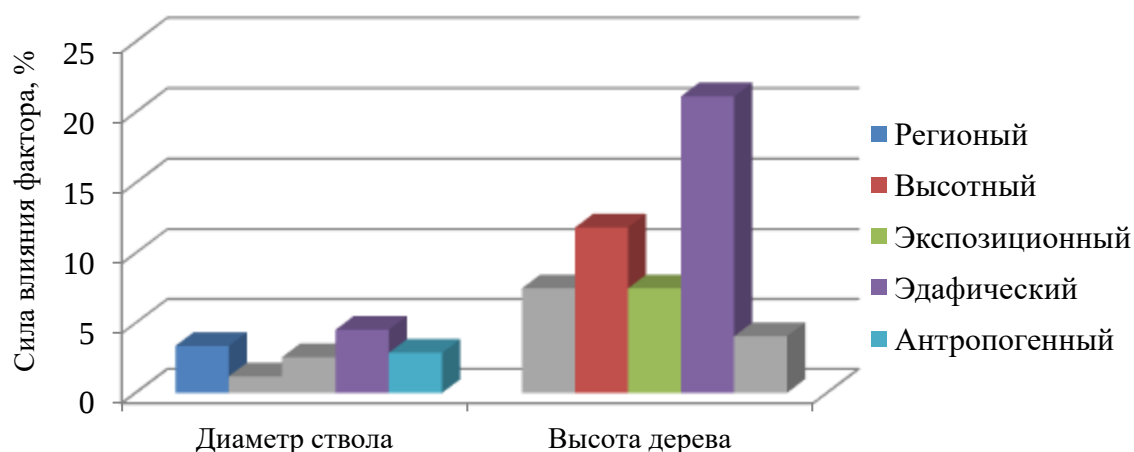


Рис. 2. Степень влияния внешних факторов на биометрические показатели высокоможжевеловых лесов Крыма

Примечание: серым цветом обозначены факторы, влияние которых достоверно не установлено

В меньшей степени (сила воздействия – 3,36 %) на биометрические характеристики высокоможжевеловых лесов влияет годовое количество осадков (региональный фактор). Наибольший средний диаметр ствола отмечен у особей, произрастающих в восточной части Крымского полуострова. Именно эта территория максимально схожа с центральной Средиземноморской частью ареала *J. excelsa*. Кроме того, древостои здесь отличаются наибольшей интенсивностью естественного возобновления. Сомкнутость их крон в среднем составляет 0,6 [3].

Еще одним фактором, оказывающим воздействие на диаметр древостоев *J. excelsa* в Горном Крыму, выступает антропогенная деятельность – 2,87%. На территориях, подвергающихся интенсивной рекреационной нагрузке, отмечены деревья с большим диаметром стволов ($24,8 \pm 2,23$ см), тогда как на участках мало подверженных антропогенной деятельности или не затронутых ею вовсе, этот показатель составляет $18,9 \pm 1,56$ см. Это связано, в первую очередь, с тем, что антропогенная нагрузка больше в старовозрастных насаждениях, привлекающих значительное внимание туристов, отдающих предпочтение «отдыху» в высокодекоративных можжевеловых насаждениях. Достоверного влияния на средний взвешенный через площадь сечения стволов диаметр древостоев других абиотических факторов выявлено не было.

При определении среднего арифметического диаметра установлено, что он составляет 20 см. Отличия между средним взвешенным через площадь сечения стволов диаметром и средним арифметическим диаметром выше, чем у *J. deltoidea* [4], и составляют 5–7 см, что так же находится в пределах допустимых значений, что, в свою очередь, говорит о достоверности полученных результатов.

При рассмотрении кривой распределения деревьев по толщине стволов (рис. 3) видно, что она имеет левостороннюю положительную асимметрию с нормальным распределением (асимметричность – 1,20; эксцесс – 0,28).

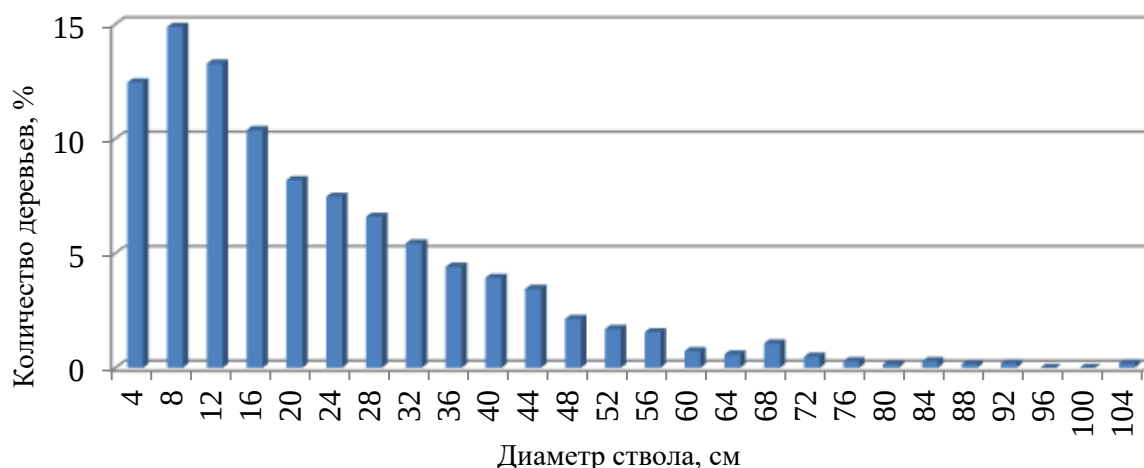


Рис. 3. Распределение стволов деревьев *J. excelsa* по диаметру

На рисунке 3 видно, что подавляющее большинство деревьев характеризуется диаметром ствола до 20 см. Однако в пределах популяции *J. excelsa* в Горном Крыму встречаются особи, диаметр ствола которых достигает 104 см. Возраст дерева оценивается в 900 лет. При этом, его жизненное состояние – удовлетворительное со средним уровнем семенной продуктивности, под кроной дерева произрастет подрост различного возраста, что говорит о высоком репродуктивном потенциале не только отдельного дерева, но и вида в целом. Присутствует раздвоение ствола, что свидетельствует о повреждении верхушечной почки на ранних этапах развития, в результате чего, возможно, было замедление роста ствола как в ширину, так и в высоту. Можно предположить, что возраст данного дерева выше установленного значения.

Средняя высота древостоев *J. excelsa* превышает высоту *J. deltooides* в 1,67 раза [4] и составляет 5 м. В целом этот показатель варьирует от 4 до 8 м (рис. 4). Коэффициент вариации 20,3 %.

Из литературных источников известно, что в Средиземноморье высота деревьев *J. excelsa* составляет 20–25 м [19, 20, 23], что 4–5 раз больше, чем в Крыму. Таким образом, можно видеть какие морфологические изменения претерпевают особи в сложных почвенно-климатических условиях полуострова. Эти преобразования, в свою очередь, выступают адаптивным механизмом, направленным на выживаемость вида в пределах северной границы его ареала.

При проведении однофакторного дифференциального анализа из расчета были исключены показатели деревьев, произрастающих на пробной площади № 19 (г. Крестовая), т. к. их высота значительно превышает высоту остальной части популяции *J. excelsa* в Горном Крыму.

Влияние факторов окружающей среды на высоту деревьев *J. excelsa* проявляется значительно сильнее, чем на диаметр их стволов. Установлено, что наибольшее воздействие оказывают эдафические условия мест произрастания древостоев (сила фактора – 21,13%).

С улучшением почвенных условий возрастает высота деревьев *J. excelsa*. В условиях сухого можжевельного бора средняя высота составляет $3,41 \pm 0,26$ м, тогда как в пределах сухой можжевельной субори этот показатель выше – $5,40 \pm 0,37$ м.

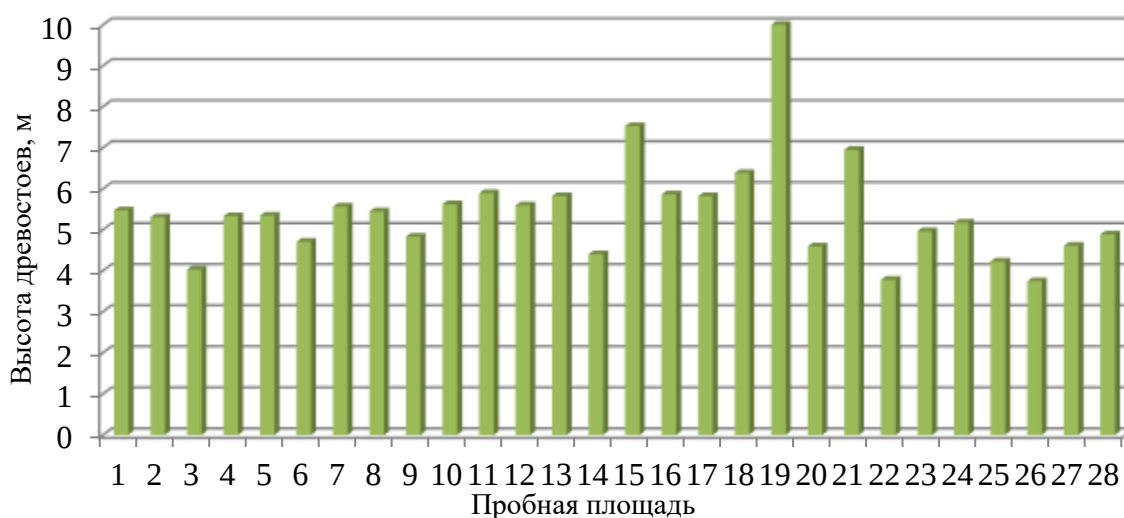


Рис. 4. Высота древостоев *J. excelsa* в Горном Крыму

В немного меньшей степени на высоту особей оказывает воздействие высотный фактор – 11,83%. На высоте 200–300 м н.у.м. произрастают самые высокие деревья. Их высота, в среднем, составляет $5,86 \pm 0,24$ м, тогда как в других высотных поясах этот показатель равен $4,22 \pm 0,38$ м. Можно предположить, что данный высотный пояс является оптимумом произрастания в условиях Крымского полуострова.

Еще одним фактором, оказывающим влияние на высоту древостоев, является экспозиция склона (7,48%). Установлено, что на слабо прогреваемых участках высота деревьев составляет $3,84 \pm 0,25$ м, тогда как на склонах с южной и юго-восточной экспозициями этот показатель составляет $5,22 \pm 0,46$ м. Достоверного влияния регионального и антропогенного факторов на высоту древостоев *J. excelsa* в Горном Крыму установлено не было.

При рассмотрении распределения деревьев *J. excelsa* по высоте (рис. 5), можно отметить, что кривая также имеет положительную асимметрию, с распределением повышенного косинуса (асимметричность – 0,97; эксцесс – -0,75). Подавляющее большинство деревьев имеет высоту 4–6 м.

Отдельно необходимо обратить внимание на древостой *J. excelsa*, произрастающий на горе Крестовая. Кривая, отражающая распределение деревьев данной пробной площади по высоте, практически не имеет асимметрии и очень близка к кривой нормального распределения (рис. 6). Данные насаждения являются уникальными по своей высоте. Именно они максимально близки к высотным показателям, описанным для вида в литературных источниках.

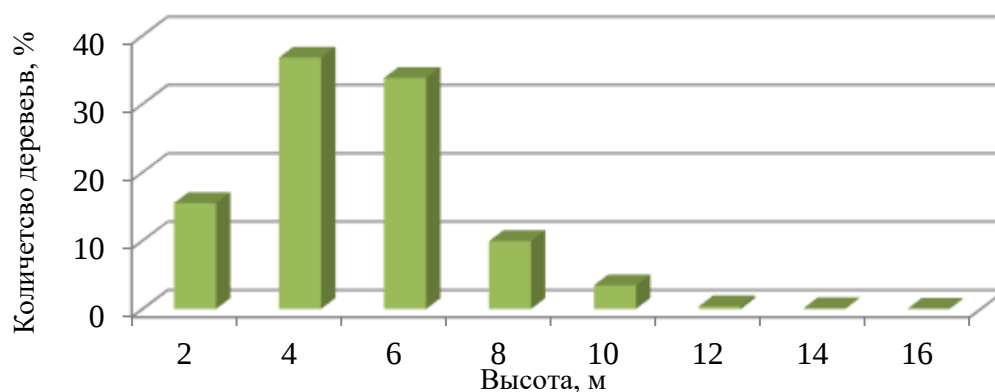


Рис. 5. Распределение деревьев *J. excelsa* по высоте

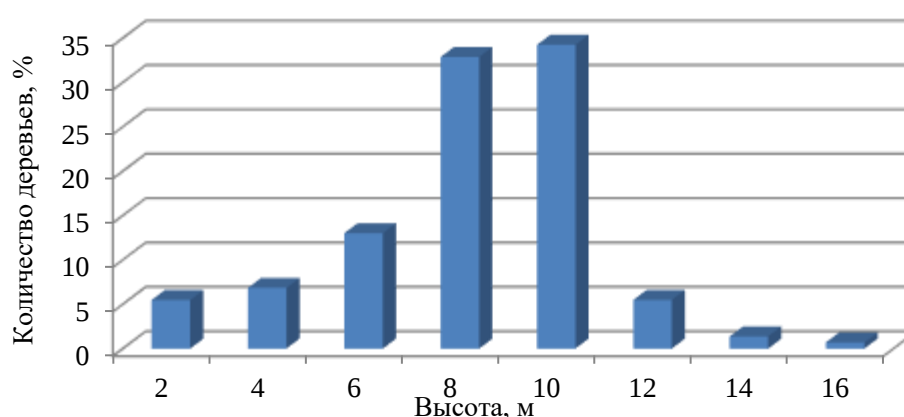


Рис. 6. Распределение деревьев *J. excelsa* по высоте (г. Крестовая)

Гора Крестовая (Урьянда-Исар) – памятник природы регионального значения, созданный 22.09.1969 года, площадь которого составляет 7 га [1]. Сложена она верхнеюрскими известняками и является отторженцем, отколовшимся от Главной гряды Крымских гор [17]. Имеет форму купола с большим количеством утесов. С трех сторон у нее скалистые склоны и только с северная сторона – пологая. Вероятно, именно форма горы и ее неприступность определили, в свою очередь, сохранность можжевельниковых древостоев. В XIII–XV веках здесь существовала крепость генуэзцев, остатки которой сохранились до наших дней. В период Османской империи активная хозяйственная деятельность завершилась и гору стали использовать как кладбище. Возраст самых старых деревьев, произрастающих на горе Крестовая совпадает с началом господствования здесь Османской империи [17].

Только древостои *J. excelsa*, произрастающие на горе Крестовая и в урочище Батилиман, характеризуются классом бонитета V, остальные можжевельниковые насаждения являются крайне низко бонитетными.

Корреляционные зависимости таксационных параметров *J. excelsa* выглядят иначе, чем у *J. deltoides*. Выявлена прямая зависимость между высотой дерева и диаметром его ствола ($r = 0,39$). Кроме того, установлена прямая зависимость между высотой дерева и

сомкнутостью древостоев, а также диаметром ствола и сомкнутостью крон ($r = 0,66$ и $r = 0,32$ соответственно). Для *J. deltoides* эти зависимости были крайне малы [4].

При сопоставлении распределения высоты деревьев и диаметров их стволов установлено, что линия тренда – восходящая. Подавляющее количество деревьев имеет высоту до 8 м и диаметр ствола до 60 см. В целом, диапазон варьирования диаметров стволов при одной высоте максимально широк. Так, например, при высоте 6 м диаметр ствола бывает от 4 до 102 см. Подобное явление можно объяснить большим количеством поврежденных деревьев. Многие имеют по несколько стволов, что свидетельствует о нарушении развития верхушечной почки и, как следствие, замедление роста дерева в целом.

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что средний диаметр древостоев *J. excelsa* – $27 \pm 1,3$ см. Среди факторов, оказывающих наибольшее влияние на диаметр стволов, можно выделить: эдафические условия и годовое количество осадков (регион произрастания).

Кроме того, выявлено, что деревья *J. excelsa* не достигают описанных в литературе высот, свойственных основной средиземноморской части ареала, что, в свою очередь, свидетельствует о неблагоприятных условиях существования вида на северной границе его распространения. В среднем, высота особей *J. excelsa* в Горном Крыму составляет $5,4 \pm 0,2$ м.

Однако обнаружены высокоможевеловые насаждения, произрастающие на горе Крестовая и являющиеся уникальным элементом крымской популяции *J. excelsa*, которые характеризуются лучшим бонитетом, максимальной сомкнутостью крон и высотой деревьев. Можно говорить о значительном потенциале вида в условиях Крымского полуострова.

Литература

1. Гора Крестовая // ООПТ России. 2023. <http://www.oopt.aari.ru/oopt>
2. Исигов В.П., Плугатарь Ю.В., Коба В.П. Методы исследований лесных экосистем Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2014. 252 с.
3. Коренькова О.О. Влияние факторов окружающей среды на развитие особей подроста древовидных можжевельников Крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия: Биология, химия. 2023. Т. 9 (75). № 3. С. 96-109.
4. Коренькова О.О. Влияния факторов окружающей среды на биометрические характеристики насаждений *Juniperus deltoides* R.P. Adams в Горном Крыму // Естественные и технические науки. 2024. № 1(188). С. 130-133.
5. Красная книга города Севастополя. Калининград; Севастополь: РОСТ-ДООАФК, 2018. 432 с.
6. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / отв. ред. д.б.н., проф. А. В. Ена и к.б.н. А. В. Фатерыга. Симферополь: АРИАЛ, 2015. 480 с.
7. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 350 с.

8. Лесная энциклопедия: В 2-х т., т.2 / Гл. ред. Г.И. Воробьев. М.: Сов. энциклопедия, 1986. 631 с.
9. Методы изучения лесных сообществ / отв. ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузова. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
10. Молчанов Е.Ф., Григоров А.Н., Голубева И.В., Ларина Т.Г., Щербатюк Л.К., Ругузов И.А., Склонная Л.У., Бескаравайный М.М. Высокоможжевеловые леса Крыма и проблема их охраны. Ялта: Гос. Никитск. ботан. сад, 1992. 296 с.
11. Особо охраняемые природные территории Севастополя / под редакцией Е.И. Голубевой, Е.А. Позаченюк. Симферополь: АРИАЛ, 2020. 140 с.
12. Плугатарь Ю.В. Леса Крыма. Симферополь: АРИАЛ, 2015. 385 с.
13. Погода в мире. 2023. <https://rp5.ru>
14. Погребняк П.С. Общее лесоводство. М.: Колос, 1968. 440 с.
15. Сергеев П.Н. Лесная таксация. М.: Гослесбумиздат, 1953. 311 с.
16. Склонная Л.У., Ругузов И.А. Методические рекомендации по элитному семеноводству тиса ягодного и можжевельника высокого. Ялта: ГНБС, 1982. 13 с.
17. Якобсон А.Л., Конопацкий А.К. Исары – очерки истории средневековых крепостей Южного берега Крыма. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. 472 с.
18. Adams R.P. The Junipers of the world: The genus *Juniperus*. 4sd ed. Trafford Publ., Victoria, BC, 2014. 422 p.
19. Farjon A., Filer D. In: An Atlas of the World's conifers. An analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status. Brill: Leiden & Boston, 2013. 512 p.
20. Farjon A. A Handbook of the World's Conifers. Brill: Leiden & Boston, 2017. 1154 p.
21. Kafi I., Calvão T., Yah, N. What happens to species at the rear-edge of their distribution in arid regions? The case of *Juniperus thurifera* L. in the Aurès Mountains (Algeria) // Land Degradation & Development. 2022. Vol. 33 (13). P. 2231-2245. <https://doi.org/10.1002/ldr.4268>
22. Rajcevic N., Dodos T., Novakovic J. Epicuticular wax variability of *Juniperus deltoides* R.P. Adams from the central Balkan // Ecology and chemophenetics. 2020. Vol. 89. P. 104008. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2020.104008>
23. Yousefi S., Avand M., Yariyan P. Identification of the most suitable afforestation sites by *Juniperus excels* specie using machine learning models: Firuzkuh semi-arid region, Iran // Ecological Informatics. 2021. Vol. 65. P. 101427.

References

1. Gora Krestovaya. (2023). *ООПТ России*. Retrieved February 25, 2024, from <http://www.oopt.aari.ru/oopt>
2. Isikov, V.P., Plugatar`, Yu.V., & Koba, V.P. (2014). *Metody` issledovaniy lesny`x e`kosistem Kry`ma*. Simferopol`: ARIAL. (in Russ.).
3. Koren`kova, O.O. (2023). Vliyanie faktorov okruzhayushhej sredy` na razvitie osobej podrosta drevovidny`x mozhzhevel`nikov Kry`ma. *Ucheny`e zapiski Kry`mskogo federal`nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Biologiya, ximiya*, 9(75), 3, 96-109. (in Russ.).

4. Koren`kova, O.O. (2024). Vliyaniya faktorov okruzhayushhej sredy` na biometricheskie xarakteristiki nasazhdenij *Juniperus deltoides* R.P. Adams v Gornom Kry`mu. *Estestvenny`e i texnicheskie nauki*, 1(188), 130-133. (in Russ.).
5. *Krasnaya kniga goroda Sevastopolya*. (2018). Kaliningrad; Sevastopol`: ROST-DOAFK. (in Russ.).
6. *Krasnaya kniga Respubliki Kry`m. Rasteniya, vodorosli i griby`*. (2015). Simferopol`: ARIAL. (in Russ.).
7. Lakin, G.F. (1990). *Biometriya*. M.: Vy`sshaya shkola. (in Russ.).
8. *Lesnaya e`nciklopediya*. (1986). (Vol.2). M.: Sov. e`nciklopediya. (in Russ.).
9. *Metody` izucheniya lesny`x soobshhestv*. (2002). SPb.: NIIKhimii SPbGU. (in Russ.).
10. Molchanov, E.F., Grigorov, A.N., Golubeva, I.V., Larina, T.G., Shherbatyuk, L.K., Ruguzov, I.A., Sklonnaya, L.U., & Beskaravajny`j, M.M. (1992). *Vy`sokomozhzhevelovy`e lesa Kry`ma i problema ix oxrany`*. Yalta: Gos. Nikitsk. botan. Sad. (in Russ.).
11. *Osobo oxranyaemy`e prirodny`e territorii Sevastopolya*. (2020) Simferopol`: IT ARIAL. (in Russ.).
12. Plugatar`, Yu.V. (2015). *Lesa Kry`ma*. Simferopol`: ARIAL. (in Russ.).
13. *Pogoda v mire*. (2023). Retrieved August 29, 2023, from <https://rp5.ru>. (in Russ.).
14. Pogrebnyak, P.S. (1968). *Obshhee lesovodstvo*. M.: Kolos. (in Russ.).
15. Sergeev, P.N. (1953). *Lesnaya taksaciya*. M.: Goslesbumizdat. (in Russ.).
16. Sklonnaya, L.U., & Ruguzov, I.A. (1982). *Metodicheskie rekomendacii po e`litnomu semenovodstvu tisa yagodnogo i mozhzhevel`nika vy`sokogo*. Yalta: GNBS. (in Russ.).
17. Yakobson, A.L., & Konopaczkiy, A.K. (1990). *Isary` – ocherki istorii srednevekovy`x krepostej Yuzhnogo berega Kry`ma*. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie. (in Russ.).
18. Adams, R.P. (2014). *The Junipers of the world: The genus Juniperus*. (4th ed). Trafford Publ., Victoria, BC.
19. Farjon, A., & Filer, D. (2013). An analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status. In: *An Atlas of the World's conifers*. Brill: Leiden & Boston.
20. Farjon, A. (2017). *A Handbook of the World's Conifers*. Brill: Leiden & Boston.
21. Kafi, I., Calvão, T., & Yah, N. (2022). What happens to species at the rear-edge of their distribution in arid regions? The case of *Juniperus thurifera* L. in the Aurès Mountains (Algeria). *Land Degradation & Development*, 33(13), 2231-2245. <https://doi.org/10.1002/ldr.4268>
22. Rajcevic, N., Dodos, T., & Novakovic, J. (2020). Epicuticular wax variability of *Juniperus deltoides* R.P. Adams from the central Balkan. *Ecology and chemophenetics*, 89, 104008. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2020.104008>
23. Yousefi, S., Avand, M., & Yariyan, P. (2021). Identification of the most suitable afforestation sites by *Juniperus excels* specie using machine-learning models: Firuzkuh semi-arid region, Iran. *Ecological Informatics*, 65, 101427. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101427>

дата поступления: 28.02.2024

дата принятия: 27.04.2024

© Коренькова О.О., 2024

ANALYSIS OF FOREST COVER CHANGE IN BEN EN NATIONAL PARK, VIETNAM

Тхиен Б.Б.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА В НАЦИОНАЛЬНОМ ПАРКЕ БЕН ЭН, ВЬЕТНАМ

Abstract. The analysis of land use and land cover (LULC) based on remote sensing and geographic information systems in Ben En National Park, Vietnam, from 2003 to 2023 has revealed significant landscape changes. Assessing the accuracy of the classification results on our Landsat satellite images has shown high reliability, with kappa coefficients above 0.9 for both 2003 and 2023, indicating strong agreement between the classified images and actual reference data. Over the two-decade period, the dominant LULC class remained natural forest, albeit experiencing a substantial reduction in coverage. In contrast, waterbodies and agricultural land expanded significantly. These LULC changes can be attributed to both natural processes and human activities, such as dam construction and water management projects. The most concerning trend is the significant decline in natural forest coverage, primarily driven by deforestation, logging, and land conversion. These activities pose a severe threat to plant biodiversity and the habitats of wildlife within Ben En National Park. Climate change, characterized by erratic weather patterns, exacerbates these challenges, disrupting forest development. Prolonged droughts and heavy rainfall disrupt the growth of planted species, aggravating the situation. Urgent measures are required to address illegal logging and deforestation, coupled with sustainable land management practices to safeguard the park's unique biodiversity. This study underscores the importance of remote sensing and geographic information systems in monitoring and addressing environmental changes, providing essential data for informed decision-making in land use planning and conservation efforts within the national park.

Keywords: Forest cover; Landsat; Deforestation; Remote Sensing; Ben En National Park.

About the author: Bui Bao Thien, ORCID: 0000-0003-2964-0012, Institute of Earth

Аннотация. Анализ использования земель и покрытия земли (LULC) на основе дистанционного зондирования и географических информационных систем в национальном парке Бен Эн, Вьетнам, с 2003 по 2023 год, показал значительные изменения в ландшафте. Оценка точности результатов классификации на наших спутниковых изображениях Landsat показала высокую надежность, с коэффициентами каппа выше 0,9 как в 2003, так и в 2023 году, что указывает на сильное согласие между классифицированными изображениями и фактическими данными. За двадцатилетний период доминирующим классом LULC оставался природный лес, хотя и с существенным сокращением площади. В то время как водоемы и сельскохозяйственные угодья значительно расширились. Эти изменения LULC могут быть объяснены как естественными процессами, так и деятельностью человека, такой как строительство плотин и проекты по управлению водными ресурсами. Самой тревожной тенденцией является значительное сокращение площади природного леса, в первую очередь из-за вырубki деревьев, лесозаготовки и преобразования земель. Эти действия представляют серьезную угрозу растительному биоразнообразию и местообитаниям дикой природы в национальном парке Бен Эн. Изменение климата, характеризующееся нестабильными погодными условиями, усугубляет эти проблемы, разрушая развитие леса. Продолжительные засухи и сильные дожди нарушают рост посаженных видов, ухудшая ситуацию. Неотложные меры необходимы для борьбы с незаконной вырубкой и вырубкой леса, совместно с устойчивыми методами землеустройства, чтобы обеспечить уникальное биоразнообразие парка. Это исследование подчеркивает важность дистанционного зондирования и географических информационных систем в мониторинге и решении экологических изменений, предоставляя необходимые данные для обоснованного принятия решений в планировании земельного использования и усилиях по сохранению в национальном парке.

Ключевые слова: Лесопокрывание; Landsat; Вырубка леса; Дистанционное зондирование; Национальный парк Бен Эн.

Sciences, Southern Federal University,
Rostov-on-Don, Russia,
buibaothienha@gmail.com

Сведения об авторе: Буй Бао Тхиен, ORCID: 0000-0003-2964-0012, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия, buibaothienha@gmail.com

Thien B.B. Analysis of Forest Cover Change in Ben En National Park, Vietnam // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 123-134. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/11>

Thien, B.B. (2024). Analysis of Forest Cover Change in Ben En National Park, Vietnam. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 123-134. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/11>

Introduction

Biological diversity forms the foundation of living resources, playing a crucial role in meeting the fundamental needs of human beings [1; 10]. It accelerates the process of decomposition, influences the chemical composition of the atmosphere, and impacts on the global climate, all of which rely on the sustainability of robust and intricate ecosystems. Forest ecosystems fulfil these essential functions, offering significant value from both economic and ecological perspectives by providing various goods and services such as water and soil protection, carbon sequestration, tourism and recreation opportunities, and non-wood forest products [2; 7; 29]. To ensure the long-term sustainability of these forest values, forest ecosystems are commonly conserved through in-situ programs such as National Parks, Nature Conservation Areas, Nature Parks, or Wildlife Development Areas [10]. While National Parks are specifically designated to contribute to global conservation efforts, they often fall short of fulfilling all their intended functions. The land use and spatial patterns of forests in National Parks constantly face the imminent threat of displacement due to rapid population growth, urbanization, excessive exploitation, and illegal logging [9; 32].

Vietnam is blessed with a significant forest cover, encompassing approximately 41% of its land area, equivalent to around 14 million hectares [23]. These forests are home to a wide range of plant and animal species, making them vital ecosystems for biodiversity conservation. Their lush green landscapes, towering trees, and rich biodiversity [6] characterize the forests in Vietnam. However, Vietnam's forests face various challenges and threats. Deforestation remains a significant issue, with an estimated loss of approximately 26,000 ha of forest annually. Factors contributing to deforestation include illegal logging, encroachment for agriculture and settlements, unsustainable land-use practices, and the demand for fuelwood [14; 19]. These activities put immense pressure on the country's forest resources and causing the degradation and fragmentation of forests. The consequences of deforestation and forest degradation are far-reaching. They include the loss of habitat for numerous plant and animal species, disruption of ecosystems, soil erosion, reduced water quality and availability, and increased greenhouse gas emissions. Addressing these challenges is crucial for the long-term sustainability of Vietnam's forests and the well-being of its people.

In contemporary times, satellite data plays a vital role in monitoring the dynamic changes occurring within forests [4; 13]. The high temporal resolution of remote sensing data makes it highly valuable for detecting alterations in forest cover. The synergistic use of remote sensing and geographic information systems (GIS) technology has proven to be the most effective tool for studying land use and land cover (LULC) on the Earth's surface [15; 19]. Mapping LULC has now become a standard method for monitoring forest cover changes. Consequently, a current study was conducted to assess the changes in forest cover in Ben En National Park, Vietnam by integrating remote sensing with GIS technology.

Materials and methods

Study area

Ben En National Park is located in the southern part of Thanh Hoa province, Vietnam, spanning from 19°31'N to 19°43'N latitude and 105°25'E to 105°38'E longitude, with a total area of 14,735 ha (Fig. 1) [17]. On January 27, 1992, Ben En National Park was established under Decision No. 33/CT by the Chairman of the Council of Ministers of Vietnam, with the objectives of conserving natural ecosystems, restoring wildlife species, conducting scientific research, developing tourism, and improving the livelihoods of the local communities [17]. The park encompasses diverse landscapes including plains, hills, and river valleys. The majority of the park's area consists of plains, while hills and rivers occupy the remaining portion, providing a rich habitat for various animal and plant species. The study area is subdivided into two distinct regions: the mountainous area and the river area, each exhibiting distinctive biological characteristics. Within the mountainous regions, the biodiversity peaks, encompassing tropical forests, temperate woodlands, and primary forests. Evergreen and deciduous tree species coexist, giving rise to a unique ecological equilibrium. The river area of Ben En National Park underscores the intricate interplay between terrestrial life and aquatic ecosystems. The rivers and lakes serve as vital water sources that underpin the survival of a myriad of fish species and aquatic organisms, fostering a delicate ecological harmony. Ben En National Park is situated in a region with a subtropical climate characterized by four distinct seasons: spring, summer, autumn, and winter. The average annual temperature ranges from 23°C to 25°C. Summers are hot and humid, while winters are relatively cold. These favorable climatic conditions have created a conducive environment for the development of diverse species within the national park.

The research area not only holds unique natural values but also plays a crucial role in the economic development of the region. In addition to preserving and maintaining valuable natural resources, the national park attracts visitors from all over to explore and enjoy its remarkable natural beauty. Tourism has become one of the main sources of revenue for the national park, contributing to the development of the local community. With the combination of diverse natural landscapes and economic growth, Ben En National Park proudly stands as an attractive and worthwhile destination in Vietnam.

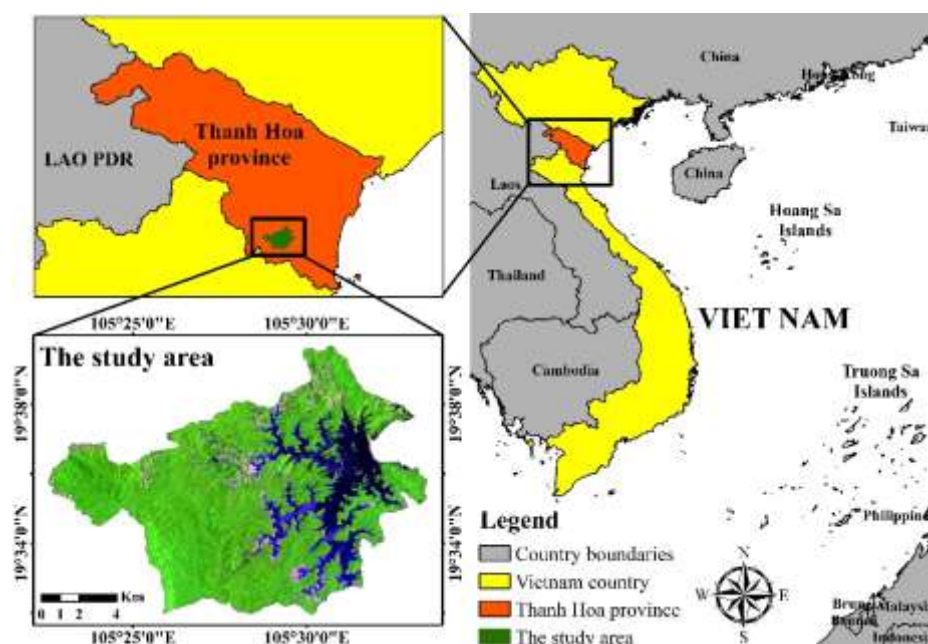


Fig. 1. Study area map of Ben En National Park, Vietnam

Data collection

Two datasets, Landsat 5-TM (2003) and Landsat 8-OLI/TIRS (2023) were obtained from the United States Geological Survey (USGS) GloVis website (<https://glovis.usgs.gov>) for analyzing LULC changes and mapping. Satellite images with a spatial resolution of 30 m and path/row 127/046 were collected during the summer of each year to minimize the impact of clouds during the classification process. Ground truth verification was conducted to validate the accuracy of the LULC classification map using samples collected through Google Earth Pro in 2003 as well as through field surveys in 2023. Through on-site surveys, we identified five main types of LULC based on different land uses. These include agricultural land (rice, tea, cashew, and black pepper), cultivated forest (white sandalwood, rosewood, bamboo, and dalbergia), natural forest (rosewood, red sandalwood, ebony, lacquer tree, and ancient tree), waterbodies (ponds, lakes, rivers, and brook), and other land cover (abandoned land, built-up areas, and rocky terrain).

Image pre-processing and supervised classification

To extract meaningful information from satellite data and facilitate interpretation, a series of image pre-processing techniques were applied [21]. These procedures included geometric corrections, image enhancement, noise removal, and topographic corrections, aiming to preprocess the raw data and enhance its interpretability [16]. Composite bands were then generated by combining specific bands to create an image with optimal band combinations. The study area was defined, and the image subset was extracted using ArcGIS 10.8 software. The extract by mask tools were utilized to isolate the image based on the study area boundaries [20]. Following the classification scheme proposed by Anderson et al. (1976) [3] and validated through field surveys,

five primary LULC categories were identified: agricultural land, cultivated forest, natural forest, waterbodies, and other land cover.

Training samples were carefully selected for each predefined LULC class by delineating polygons around representative areas [12; 26]. Spectral signatures, which represent the characteristic spectral properties of each land cover type, were derived from the satellite images using these defined polygons. The selection of representative training samples ensured minimal confusion between the mapped land cover classes. For LULC classification of the acquired images from 2003 and 2023, a rule-based supervised classification approach called the maximum likelihood classifier (MLC) was employed [12; 30]. The MLC algorithm allows the analyst to manually select pixels that represent the desired land cover classes. To refine the classification results and improve accuracy while reducing misclassifications, a post-classification refinement technique was applied. The adopted LULC classification approach ensured consistency in defining each land cover category and provided clear boundaries based on variations in natural and anthropogenic features within the study area. Moreover, this classification method is scale-independent, making it applicable at various spatial scales and levels of detail.

Classification accuracy assessment

In change detection analysis involving classification data, it is crucial to assess the accuracy of the classification results. The aim is to determine the quality of spatial classification information obtained from remotely sensed data and its correspondence with reference information [12]. The kappa coefficient is a widely used metric to quantify the classification accuracy and the performance of the analysts involved in the classification process [21]. To assess the classification accuracy, 100 random points were selected using stratified randomization in ArcGIS 10.8 software. These points were distributed across the study area to represent different LULC classes. This approach ensures that each LULC class is adequately represented by reference points, minimizing bias in accuracy estimates. The reference data and the classification results were statistically compared using an error matrix. The kappa coefficient was expressed by the formula below to calculate the degree of agreement between the reference data and the classification results:

$$\text{Kappa} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

where P_o is the agreement ratio between the predicted classification results and the actual classification results. P_e is the random agreement ratio between the predicted classification results and the actual classification results.

Land use/land cover change detection

The post-classification change detection technique, acknowledged as the most accurate approach, compares independently produced classifications of images from different dates to detect changes in LULC. We compiled change maps to illustrate the specific changes observed between each pair of classified images. Utilizing pixel-based comparisons, we generated information that identifies changes on a pixel-by-pixel basis and facilitates a more efficient

interpretation of the “from-to” transitions [18]. By performing cross-tabulation, we compared the categories of image pairs to determine qualitative and quantitative differences between the 2003 and 2023 datasets. This analysis enabled us to obtain a two-way cross-matrix, which described the primary patterns of change within the study area.

Results and discussion

The LULC classification map in Ben En National Park for the years 2003 and 2023 was depicted in Figure 2. Table 1 presents the area, proportion, and changes of each corresponding LULC type during the period 2003–2023. From the data in Table 1, it can be observed that significant changes have occurred over the 20 years in the study area. Before using satellite image-based classification results for change detection, we first evaluated their accuracy by checking the results obtained with reference data. The overall accuracy values of the classification results in this study area for the years 2003 and 2023 were 92.0% and 92.8%, respectively. Moreover, the kappa coefficients were 0.901 and 0.910 for the years 2003 and 2023, respectively. The kappa coefficient serves as a quantitative measure of the classification accuracy, providing valuable insights into the agreement between the classified image and the ground truth reference data [11]. Kappa coefficients ranging from 0.81 to 1.00 are considered almost perfect in LULC classification [22; 31]. These results show reliable land cover classification and good consistency between referenced and classified maps.

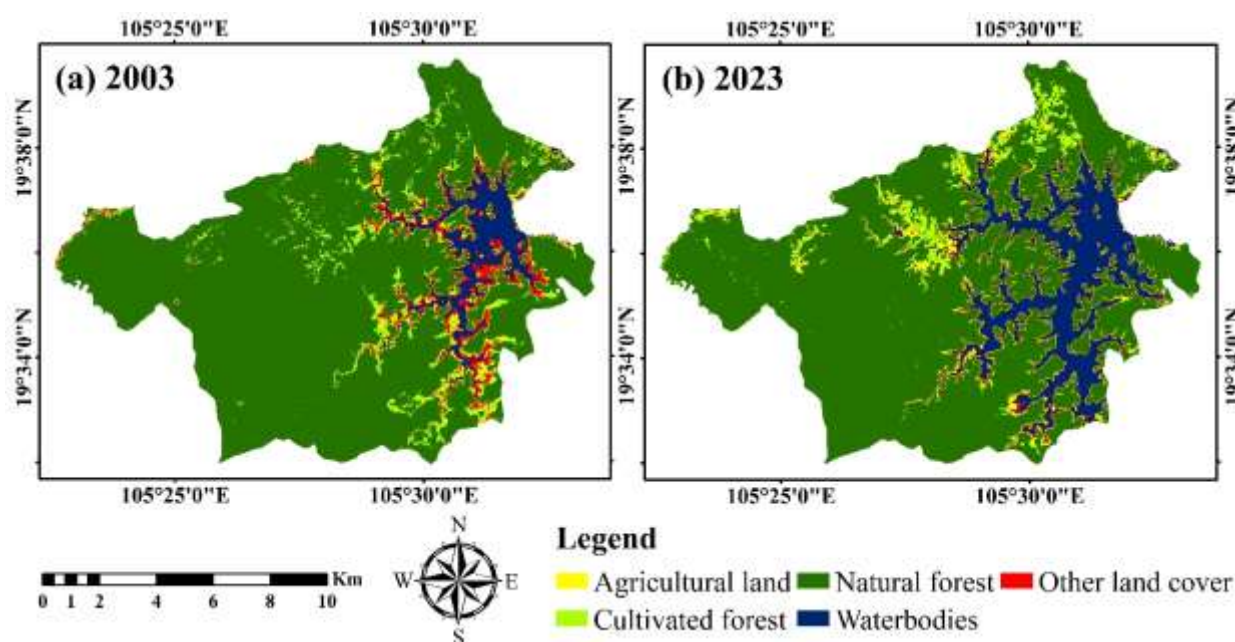


Fig. 2. Land use/land cover maps for Ben En National Park in (a) 2003 and (b) 2023

The classification results have indicated that in 2003, the natural forest class area was the largest area within the research area, accounting for 83.09% (12243.22 ha) (Table 1). Following that, the waterbodies class area accounted for 5.62% (827.95 ha), the cultivated forest class area accounted for 5.24% (772.79 ha), and other land cover classes area accounted for 4.08% (601.79 ha). Lastly, the agricultural land class area had the smallest coverage within the research area at

1.96% (289.25 ha) (Table 1). By the year 2023, the natural forest class area had experienced a reduction in coverage; however, it remained the predominant land cover class within the research area, accounting for 75.00% (11050.80 ha). Furthermore, the cultivated forest and other land cover classes area had also decreased to 5.14% (758.02 ha) and 2.63% (387.24 ha), respectively (Table 1). Meanwhile, the area of agricultural land and waterbodies classes had increased to 3.62% (532.85 ha) and 13.61% (2006.09 ha), respectively of the total research area.

Table 1

The land use/land cover area distribution from 2003 to 2023 in Ben En National Park

Class	2003		2023		Change in 2003-2023	
	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%
Agricultural land	289.25	1.96	532.85	3.62	243.60	1.65
Cultivated forest	772.79	5.24	758.02	5.14	-14.77	-0.10
Natural forest	12243.22	83.09	11050.80	75.00	-1192.42	-8.09
Waterbodies	827.95	5.62	2006.09	13.61	1178.14	8.00
Other land cover	601.79	4.08	387.24	2.63	-214.55	-1.46
Total	14735.00	100.00	14735.00	100.00		

Figure 3 illustrates the changes in land cover classes within the Ben En National Park from 2003 to 2023. From Table 1, it can be observed that, during this period, most of the LULC changes occurred in the natural forest and waterbodies classes. The area of the waterbodies class has increased the most, with a total area increase of 1178.14 ha (8.00%). This significant increase in waterbodies may be due to natural processes like increased rainfall or changes in hydrological patterns [25; 28]. It could also result from human activities such as dam construction or irrigation projects, which may have led to the creation of new water bodies or the expansion of existing ones. In addition, the area of agricultural land class has also increased by 243.60 ha, equivalent to 1.65% of the total area of the study area. The expansion of agricultural land can be linked to factors like population growth, agricultural development, or changes in land-use policies [24]. Conversion of natural areas, including forests, into agricultural land is a common reason for such increases. In contrast, the natural forest area class has been reduced the most with 1192.42 ha (8.09%), along with other land cover classes also reduced with 214.55 ha (1.46%) (Table 1). The substantial reduction in natural forest area may be primarily due to deforestation, logging, and land conversion for agricultural or developmental purposes [8]. Human activities, illegal logging, and forest clearance for infrastructure or agricultural expansion are typical causes of deforestation. Finally, the cultivated forest class from 2003 to 2023 has also been reduced by 14.77 ha (0.10%) (Table 1). The reduction in cultivated forest may be due to factors like shifting agricultural practices, abandonment of cultivated areas, or changes in land management [5]. These factors can lead to a decrease in the extent of cultivated forest over time.

GIS analysis was used for post-classification comparison of the detected changes, with a change map generated for the period 2003–2023 to understand the spatial pattern of change (Fig. 3). The classified maps were overlayed to create a LULC volatility map; a cross-tabulation matrix was also generated for the period 2003–2023 (Table 2) to show the nature of changes in the

different cover classes [27]. Among the total agricultural land area of 289.25 ha in 2003, 18.18 ha remained as agricultural land in 2020. However, 199.85 ha were converted into the waterbodies class, 47.71 ha became other land cover, and the remaining 23.51 ha were converted into cultivated forest and natural forest. The cultivated forest class retained only 99.92 ha out of the initial total of 772.79 ha in 2003; the rest was converted to all other classes (Table 2). During the period 2003–2023, the cultivated forest class, with the lowest area loss primarily due to receiving 638.37 ha from natural forest conversion, accounted for most of the loss. In the total natural forest area of 12,243.22 ha in 2003, most of the lost area was converted into cultivated forest, as mentioned above. There was also an additional 665.23 ha converted into other land cover classes, including agricultural land, water bodies, and other land cover. Meanwhile, 10,939.62 ha of natural forest area have been retained by 2023. The waterbodies class increased from 827.95 ha (2003) to 2006.09 ha (2023). Of the initial total area of this class, 824.91 ha were retained, with the most significant increase observed from the other land cover class (530.65 ha), followed by cultivated forest (329.80 ha), agricultural land (199.85 ha), and natural forest (120.88 ha). The other land cover class decreased from 601.79 ha in 2003 to 387.24 ha in 2023. Only 38.85 ha remained as other land cover, while the rest was converted into other classes such as cultivated forest and natural forest (Table 2).

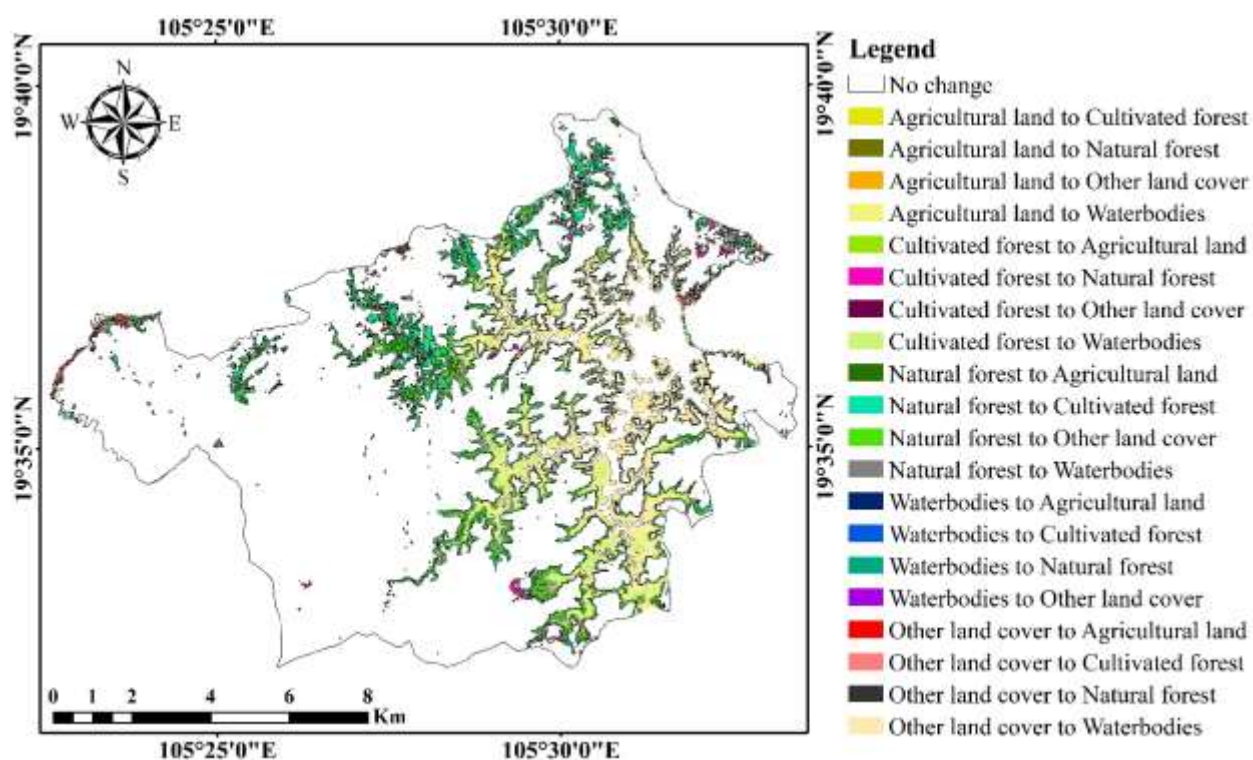


Fig. 3. Land use/land cover changes map from 2003 to 2023 in Ben En National Park

The results of the change matrix analysis (Table 2) indicate a significant reduction in the natural forest and cultivated forest areas during the study period. This reflects that conservation policies for plant biodiversity and the habitats of wildlife within Ben En National Park are facing

urgent challenges. The ongoing issue of illegal logging for production and construction materials has resulted in the conversion of a portion of natural forests and sparse forests into other LULC classes, leading to a reduction in green space within the forested area [21; 27]. This negatively impacts the land protective capabilities and water retention, affecting the local ecosystem. Climate change is another factor influencing the development of forested areas within Ben En National Park. Abnormal weather patterns such as prolonged droughts and heavy rainfall have disrupted the forest's condition, hindering the growth of planted species. Additionally, the construction of dams to retain water has also increased the area of water areas, engulfing most of the area of natural forest and cultivated forest.

Table 2

Cross-tabulation of land cover classes between 2003 and 2023 (area in ha)

2003 \ 2023	Agricultural land	Cultivated forest	Natural forest	Waterbodies	Other land cover	Total
Agricultural land	18.18	10.03	13.48	199.85	47.71	289.25
Cultivated forest	132.70	99.92	85.10	329.80	125.27	772.79
Natural forest	370.81	638.37	10939.62	120.88	173.54	12243.22
Waterbodies	0.35	0.24	0.58	824.91	1.87	827.95
Other land cover	10.81	9.46	12.02	530.65	38.85	601.79
Total	532.85	758.02	11050.80	2006.09	387.24	14735.00

Conclusion

In this study, Landsat 5-TM and Landsat 8-OLI/TIRS image data were used to perform supervised classification and LULC maps for the years 2003 and 2023 in Ben En National Park. GIS analysis was then used to overlay the LULC map classes and obtain a change map, with a diagonal matrix created for 2003–2023 to understand the changes in types better. Over the 20 years, the study area has experienced a decline in natural forest, cultivated forest and other land cover classes, with area decreases of 8.09%, 0.10%, and 1.46%, respectively. Additionally, there has been a substantial increase in the extent of agricultural land and waterbodies class areas from 2003 to 2023, with a total increase of 1.65% and 8.00%, respectively. Changes in LULC classes in Ben En National Park, as revealed by this study, are largely associated with human activities. If these LULC trends persist, they are likely to have significant environmental and economic ramifications, impacting the local population's livelihoods. This research underscores the importance of combining remote sensing and GIS in monitoring LULC and forest changes. It provides valuable insights into the spatial distribution and character of land cover changes in Ben En National Park. Based on this research, we recommend that relevant authorities consider implementing solutions such as increasing human resources for monitoring and protecting forest cover from illegal logging activities. Strict enforcement of laws and regulations is also essential for preserving forested areas within the study region. Lastly, we hope that this research can assist national park management agencies in generating the necessary environmental education materials, policy design, and decision-making processes for the conservation and management of

forest ecosystems. This includes efforts to protect against illegal logging to prevent loss and degradation of plant biodiversity.

References

1. Agbedahin, A.V. (2019). Sustainable development, Education for Sustainable Development, and the 2030 Agenda for Sustainable Development: Emergence, efficacy, eminence, and future. *Sustainable Development*, 27(4), 669-680. <https://doi.org/10.1002/sd.1931>
2. Ahammad, R., Stacey, N., & Sunderland, T.C. (2019). Use and perceived importance of forest ecosystem services in rural livelihoods of Chittagong Hill Tracts, Bangladesh. *Ecosystem services*, 35, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.11.009>
3. Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T., & Witmer, R.E. (1976). A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *Geological survey professional paper, U.S. government printing office*. Washington DC, 964, 1-28.
4. Brovelli, M.A., Sun, Y., & Yordanov, V. (2020). Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 580. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100580>
5. Chen, Z., Huang, M., Zhu, D., & Altan, O. (2021). Integrating remote sensing and a markov-FLUS model to simulate future land use changes in Hokkaido, Japan. *Remote Sensing*, 13(13), 2621. <https://doi.org/10.3390/rs13132621>
6. Cisar-Erlach, A. (2019). *The Flavor of Wood: In Search of the Wild Taste of Trees from Smoke and Sap to Root and Bark*. Abrams.
7. Doimo, I., Masiero, M., & Gatto, P. (2020). Forest and wellbeing: Bridging medical and forest research for effective forest-based initiatives. *Forests*, 11(8), 791. <https://doi.org/10.3390/f11080791>
8. Febriyanti, A.R., Ratnasari, R.T., & Wardhana, A.K. (2022). The effect of economic growth, agricultural land, and trade openness moderated by population density on deforestation in OIC countries. *Quantitative Economics and Management Studies*, 3(2), 221-234.
9. Garrett, R.D., Cammelli, F., Ferreira, J., Levy, S.A., Valentim, J., & Vieira, I. (2021). Forests and sustainable development in the Brazilian Amazon: history, trends, and future prospects. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 625-652. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-010228>
10. Heckl, F., Lexer, W., Vacik, H., Wolfslehner, B., & Hackl, J. (2003). *Foundations for the implementation of the ecosystem approach defined under the Convention on Biological Diversity*. Vienna: Federal Environment Agency Austria.
11. Islami, F.A., Tarigan, S.D., Wahjunie, E.D., & Dasanto, B.D. (2022). Accuracy assessment of land use change analysis using Google Earth in Sadar Watershed Mojokerto Regency. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 950(1), 012091. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012091>
12. Isma'il, M., Zubairu, S.M., Aliyu, A., Ahmed, M.H., Ibrahim, S., Magaji, A., & Hassan, I.M. (2023). Evaluating the Performance of Machine Learning Algorithms and Maximum Likelihood

Classifier for Land-Use and Land-Cover Change Detection in Yola, Nigeria. *SLU Journal of Science and Technology*, 7(1), 97-115. <https://doi.org/10.56471/slujst.v7i.380>

13. Jamal, S., & Ahmad, W.S. (2020). Assessing land use land cover dynamics of wetland ecosystems using Landsat satellite data. *SN Applied Sciences*, 2, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03685-z>

14. Ken, S., Sasaki, N., Entani, T., Ma, H.O., Thuch, P., & Tsusaka, T.W. (2020). Assessment of the local perceptions on the drivers of deforestation and forest degradation, agents of drivers, and appropriate activities in Cambodia. *Sustainability*, 12(23), 99–87. <https://doi.org/10.3390/su12239987>

15. Macarringue, L.S., Bolfe, É.L., & Pereira, P.R.M. (2022). Developments in land use and land cover classification techniques in remote sensing: A review. *Journal of Geographic Information System*, 14(1), 1-28. <https://doi.org/10.4236/jgis.2022.141001>.

16. Mishaa, M.M., Andrushia, A.D., & Neebha, T.M. (2021). Image based land cover classification for remote sensing applications-A review. In *3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC)* (pp. 152-155). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSPC51351.2021.9451755>

17. Nga, N.T.P., & Truong, N.X. (2018). Assessment of ecological tourism development at Ben En National Park, Thanh Hoa province in sustainable development. *TNU Journal of Science and Technology*, 186(10), 77-82. (in Vietnamese)

18. Peng, D., Bruzzone, L., Zhang, Y., Guan, H., & He, P. (2021). SCDNET: A novel convolutional network for semantic change detection in high resolution optical remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103, 102465. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102465>

19. Phumee, P., Pagdee, A., & Kawasaki, J. (2018). Energy crops, livelihoods, and legal deforestation: a case study at Phu Wiang National Park, Thailand. *Journal of Sustainable Forestry*, 37(2), 120-138. <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1318292>

20. Phuong, V.T., & Thien, B.B. (2023). A multi-temporal Landsat data analysis for land-use/land-cover change in the Northwest mountains region of Vietnam using remote sensing techniques. *Forum Geografic*, 22(1), 54-66. <https://doi.org/10.5775/fg.2023.030.i>

21. Phuong, V.T., & Thien, B.B. (2023). Using Landsat Satellite Images to Detect Forest Cover Changes in the Northeast Region of Vietnam. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 16(1), 19-36. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.2>

22. Regasa, M.S., Nones, M., & Adeba, D. (2021). A review on land use and land cover change in Ethiopian basins. *Land*, 10(6), 585. <https://doi.org/10.3390/land10060585>

23. Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Cheng, Y.S., & Chen, S.H. (2023). Multidecadal evaluation of changes in coffee-growing areas using Landsat data in Central Highlands, Vietnam. *Geocarto International*, 38(1), 2204099. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2204099>

24. Tadese, M., Kumar, L., Koech, R., & Kogo, B.K. (2020). Mapping of land-use/land-cover changes and its dynamics in Awash River Basin using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100352. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100352>

25. Wierik, S.A., Cammeraat, E.L., Gupta, J., & Artzy-Randrup, Y.A. (2021). Reviewing the impact of land use and land-use change on moisture recycling and precipitation patterns. *Water Resources Research*, 57(7), e2020WR029234. <https://doi.org/10.1029/2020WR029234>
26. Thien, B.B. (2023). Using GIS Tools to Detect the Land Use/Land Cover Changes in Ha Nam province, Vietnam. *Regional Geosystems*, 47(4), 593-606. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-593-606>
27. Thien, B.B., Phuong, V.T., & Komolafe, A.A. (2023). Assessment of forest cover and forest loss using satellite images in Thua Thien Hue province, Vietnam. *AUC Geographica*, 58(2), 172-186. <https://doi.org/10.14712/23361980.2023.13>
28. Thien, B.B., Sosamphanh, B., Yachongtou, B., & Phuong, V.T. (2022). Land use/land cover changes in the period of 2015–2020 in AngYai Village, Sikhottabong District, Vientiane Capital, Lao PDR. *Geology, Geophysics and Environment*, 48(3), 279-286. <https://doi.org/10.7494/geol.2022.48.3.279>
29. Thien, B.B., Yachongtou, B., & Phuong, V.T. (2023). Long-term monitoring of forest cover change resulting in forest loss in the capital of Luang Prabang province, Lao PDR. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8), 947. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11548-4>
30. Verma, P., Raghubanshi, A., Srivastava, P.K., & Raghubanshi, A.S. (2020). Appraisal of kappa-based metrics and disagreement indices of accuracy assessment for parametric and nonparametric techniques used in LULC classification and change detection. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1045-1059. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00740-x>
31. Wahla, S.S., Kazmi, J.H., & Tariq A. (2023). Mapping and monitoring of spatio-temporal land use and land cover changes and relationship with normalized satellite indices and driving factors. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2187567>
32. Wiwoho, B.S., Phinn, S., & McIntyre, N. (2023). Two Decades of Land-Use Dynamics in an Urbanizing Tropical Watershed: Understanding the Patterns and Drivers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(3), 92. <https://doi.org/10.3390/ijgi12030092>

дата поступления: 10.10.2023

дата принятия: 10.04.2024

© Thien B.B., 2024