

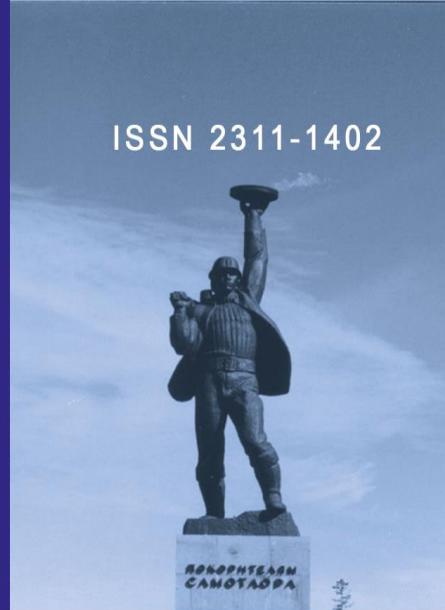
16+

ISSN 2311-1402

B
e
s
c
T

H
I
K

НИЖНЕВАРТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА



БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

4(72)/2025





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/10.36906/2311-4444/25-4>

Учредитель: ФГБОУ ВО «Нижневартовский 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», 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,
ХМАО-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 результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (по состоянию на 25.11.2025 г. 19.04.2025 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 СС, поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

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

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

Подготовлено и отпечатано в издательстве НВГУ
Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 15.12.2025
Дата выхода 20.12.2025
Формат 60×84 1/8. Гарнитура Times. Усл. печ. листов 9,48.
Тираж 100 экз. Заказ 2351 Цена: бесплатно

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

© Нижневартовский государственный университет, 2025





BULLETIN

of NIZHNEVARTOVSK
STATE UNIVERSITY



Bulletin of Nizhnevartovsk State University was founded in 2008

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

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4>

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, 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. LP No. 020742. Signed for printing on 15.12.2025
Release date 20.12.2025
Format 60×84 1/8. Times typeface. CONV. print sheets 9.48.
Circulation 100 copies. Order 2351. Free

A.M. Yakovleva, commissioning editor
D.V. Vilyavin, technical editor

© Nizhnevartovsk State University, 2025



СОДЕРЖАНИЕ

Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А.	
Анатомо-морфологические и биохимические показатели разновозрастной хвои <i>Pinus sibirica</i> Du Tour (Средний Урал)	4
Казанцева М.Н., Попов П.П., Арефьев С.П. Изменчивость основных систематических признаков гибридной формы елей <i>Picea abies</i> и <i>P. obovata</i> (Pinaceae)	16
Свириденко Б.Ф. Общая минерализация и химический состав воды как важные факторы для изучения экобиоморф и экологических ниш гидромакрофитов.....	29
Тагиров А.Р. Морфологическая характеристика сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) при естественном возобновлении на отвалах Кумертауского буроугольного разреза (Россия, Республика Башкортостан)	43
Чичканова Е.С., Гребенникова О.А. Особенности сезонных ритмов роста и развития представителей рода <i>Coreopsis</i> L. и накопление в их соцветиях антиоксидантов	56
Битнер М.И., Смолина Н.В., Уткин Я.А. Половой диморфизм и генетическое разнообразие популяции <i>Carassius carassius</i> в эвтрофном водоеме бассейна реки Тура	70
Живов Д.А., Сухарева Т.А. Запасы азота и углерода в почвах еловых лесов Мурманской области	84
Гогой Т.Д., Гогой С.Б., Сторчак Т.В., Конвар Д. Гидрохимический анализ и корреляционные взаимосвязи растворенных ионов в пластовых водах нефтяных месторождений Верхнеассамского бассейна	101
Гайнанов С.Г., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю., Янбаев Р.Ю., Бахтина С.Ю. Естественное возобновление в пригородных широколиственных лесах г. Уфы	123

CONTENT

N.V. Chukina, N.V. Lukina, E.I. Filimonova, M.A. Glazyrina	
Anatomical, Morphological, and Biochemical Characteristics of Different-Aged Needles of <i>Pinus sibirica</i> Du Tour (Middle Urals)	4
M.N. Kazantseva, P.P. Popov, S.P. Arefyev Variability of the Main Systematic Features of the Hybrid Shape of Firs <i>Picea abies</i> and <i>P. obovata</i> (Pinaceae)	16
B.F. Sviridenko Total Salt Content and Chemical Composition of Water as Important Factors for the Study of Ecobiomorphes and Ecological Niches of Hydromacrophytes	29
A.R. Tagirov	
Morphological Characteristics of the Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) During Natural Regeneration in the Dumps of the Kumertau Lignite Section (Russia, the Republic of Bashkortostan)	43
E.S. Chichkanova, O.A. Grebennikova Features of Seasonal Rhythms of Growth and Development of Representatives of the Genus <i>Coreopsis</i> L. and the Accumulation of Antioxidant Substances in their Inflorescences ...	56
M.I. Bitner, N.V. Smolina, Y.A. Utkin	
Sexual Dimorphism and Genetic Diversity of the <i>Carassius carassius</i> Population in the Eutrophic Water Body of the Tura Basin.....	70
D.A. Zhivov, T.A. Sukhareva Nitrogen and Carbon Reserves in the Soils of Spruce Forests of the Murmansk Region.....	84
T.J. Gogoi, S.B. Gogoi, T.V. Storchak, D. Konwar Correlation Analysis and Hydrochemical Facies of Contaminant Ions in Oilfield Produced Water of the Upper Assam Basin	101
S.G. Gainanov, Y.A. Yanbaev, A.Y. Kulagin, R.Y. Yanbaev, S.Y. Bakhtina Natural Regeneration in the Suburban Broad- Leaved Stands in Ufa	123



ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ / PLANT ECOLOGY

УДК 631.531:504.064.2

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/01>

Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А.

АНАТОМО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗНОВОЗРАСТНОЙ ХВОИ *PINUS SIBIRICA* DU TOUR (СРЕДНИЙ УРАЛ)

N.V. Chukina, N.V. Lukina, E.I. Filimonova, M.A. Glazyrina

ANATOMICAL, MORPHOLOGICAL, AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT-AGED NEEDLES OF *PINUS SIBIRICA* DU TOUR (MIDDLE URALS)

Аннотация. Целью исследований было изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик разновозрастной хвои *Pinus sibirica* Du Tour, произрастающей в естественном местообитании в таежной зоне (Средний Урал). Анатомо-морфологические параметры хвои изучали на поперечных срезах с использованием системы обработки изображений «SIAMS MesoPlant». Содержание низкомолекулярных антиоксидантов, таких как пролин, аскорбиновая кислота, фенольные соединения, в том числе и флавоноиды, уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) в хвои исследовали стандартными спектрофотометрическими методами. Показано, что с увеличением возраста хвои *P. sibirica* наблюдалось уменьшение таких анатомо-морфологических показателей, как площадь поперечного сечения хвои, площадь мезофилла и центрального цилиндра. Толщина покровных тканей хвои (эпидермы и гиподермы) в процессе возрастного развития достоверно не изменялась. Выявлено, что с увеличением возраста хвои, происходило уменьшение концентрации зеленых пигментов за счет достоверного снижения содержания хлорофилла *a*, также уменьшение соотношения хлорофилла *a* к антенным пигментам. Содержание в хвои каротиноидов и хлорофилла *b* достоверно не изменялось, что указывает на относительную стабильность пула антенных пигментов. В 4-летней хвои увеличивалась интенсивность ПОЛ и, как следствие, активизировалась система антиоксидантной защиты, что проявлялось в увеличении содержания фенольных соединений и свободного пролина. С увеличением возраста хвои происходило снижение накопления аскорбиновой кислоты.

Ключевые слова: *Pinus sibirica*; анатомия хвои; фотосинтетические пигменты; перекисное окисление липидов; низкомолекулярные антиоксиданты.

Abstract: The aim of the present study was to investigate the anatomical, morphological, and biochemical characteristics of *Pinus sibirica* Du Tour needles of different ages, growing in their natural habitat in the taiga zone (Middle Urals). Anatomical and morphological parameters of the needles were analyzed in cross-sections using the «SIAMS MesoPlant» image processing system. The content of low-molecular antioxidants, such as proline, ascorbic acid, phenolic compounds, including flavonoids, and the level of lipid peroxidation (LPO) in the needles were analyzed using standard spectrophotometric methods. It was shown that with the needle aging a decrease in anatomical and morphological parameters such as cross-sectional area, mesophyll area, and central cylinder was observed. The thickness of the covering tissues (epidermis and hypodermis) did not change significantly with the needle aging. It was found the decrease of green pigments concentration in needles due to a significant reduction in chlorophyll *a*, as well as a decrease in the ratio of chlorophyll *a* to antenna pigments with the needle aging. The content of carotenoids and chlorophyll *b* in the needles did not change significantly, indicating the stability of antenna pigments pool. A significant increase in lipid peroxidation was observed in 4-year-old needles, as a result, the antioxidant defense system was activated, manifested by an increase in the phenolic compounds and free proline content. The accumulation of ascorbic acid decreased with the needle aging.

Key words: *Pinus sibirica*; needles anatomy; photosynthetic pigments; lipid peroxidation; low-molecular antioxidants.

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



Сведения об авторах: Чукина Надежда Владимировна, ORCID: 0000-0001-5517-0240, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, Екатеринбург, nady_dicusar@mail.ru; Лукина Наталья Валентиновна, ORCID: 0000-0001-6425-6214, канд. биол. наук, доцент; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, Екатеринбург, natalia.lukina@urfu.ru; Филимонова Елена Ивановна, ORCID: 0000-0001-6937-0139, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, Екатеринбург, Elena.Filimonova@urfu.ru; Глазырина Маргарита Александровна, ORCID: 0000-0001-8258-270X, канд. биол. наук, доцент; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, Екатеринбург, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

Biological Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Russia, Yekaterinburg, nady_dicusar@mail.ru; Natalia V. Lukina, ORCID: 0000-0001-6425-6214, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Russia, Yekaterinburg, natalia.lukina@urfu.ru; Elena I. Filimonova, ORCID: 0000-0001-6937-0139, Candidate of Biological Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Russia, Yekaterinburg, Elena.Filimonova@urfu.ru; Margarita A. Glazyrina, ORCID: 0000-0001-8258-270X, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Russia, Yekaterinburg, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Анатомо-морфологические и биохимические показатели разновозрастной хвои *Pinus sibirica* Du Tour (Средний Урал) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 4-15. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/01>

Chukina, N.V., Lukina, N.V., Filimonova, E.I., & Glazyrina, M.A. (2025). Anatomical, Morphological, and Biochemical Characteristics of Different-Aged Needles of *Pinus sibirica* Du Tour (Middle Urals). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 4-15. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/01>

Введение. Сосна кедровая сибирская или кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour, *Pinaceae* Lindl.) – является одним из наиболее характерных деревьев центральной части хвойной зоны в Западно-Сибирской низменности [17], широко распространена на территории Урала, Алтайского края и северо-востока европейской части Российской Федерации [6], а также на территории Казахстана и Монголии. В других местах земного шара это растение в естественном состоянии не произрастает [1; 16]. В пределах Урала и прилегающих равнинных областей нижняя граница ареала *P. sibirica* проходит немного севернее г. Екатеринбурга, а южная на Приполярном Урале [12].

P. sibirica – редкий пример сочетания в одном древесном растении устойчивости к условиям среды и долговечности, декоративных и оздоровительных свойств, вследствие чего имеет большое хозяйственное значение. Важное достоинство *P. sibirica* – его смола или живица, которая используется для получения таких ценных продуктов, как кедровый бальзам, иммерсионное масло, скипидар, канифоль [1; 5; 6; 16]. Кедровые орехи являются важным пищевым, кормовым и лекарственным ресурсом [6]. Хвоя *P. sibirica* – источник большого количества биологически активных веществ, которые успешно применяются в парфюмерии и медицине. Она богата эфирными маслами, микроэлементами, содержит β-каротин, аскорбиновую кислоту, витамины группы В и др. [16]. Содержание

биологически активных веществ в хвое голосеменных растений во многом зависит, как от продолжительности жизни хвои, так и от ее анатомо-морфологических параметров [10; 15]. Процессы старения хвои голосеменных в отличие от листопадных и вечнозеленых двудольных растений варьируют от 1 года у *Larix sibirica* Ledeb., 3–6 лет, а в субальпийском поясе до 4–12 лет у *P. sibirica*, и до 12–15 лет у *Picea obovata* Ledeb. [4; 6]. Показано, что на анатомо-морфологические и физиолого-биохимические параметры хвои большое влияние оказывают экологические факторы и погодно-климатические условия, такие как температура, влажность воздуха, уровень инсоляции и др. [2; 10; 15]. Отмечено, что в процессе возрастного развития хвои *P. sibirica* прослеживаются изменения ее анатомо-морфологических структур [14], активности пигментного комплекса [11; 14], содержания вторичных метаболитов [8], витаминов (например, витамина С), эфирных масел. В то же время данные по их накоплению в хвое разного возраста противоречивы. Однако работы, включающие комплексную оценку анатомо-морфологических и биохимических параметров разновозрастной хвои *P. sibirica*, произрастающей в естественных лесных фитоценозах на границе подзон южной и средней тайги на Среднем Урале не проводились, что и определило актуальность настоящего исследования. Выбор территории был связан с тем, что подзоны средней и южной тайги на Урале характеризуются хорошими условиями для жизнедеятельности хвойных пород. Здесь формируются насаждения с участием *P. sibirica* IV, реже V классов бонитета.

Цель работы – изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик разновозрастной хвои *Pinus sibirica* Du Tour в естественном местообитании на Среднем Урале.

Объекты и методы исследования. Исследования проводили в июле 2022 г. в естественном лесном фитоценозе, расположенном в 17 км от г. Нижняя Тура ($58^{\circ}40'05''\text{N}$ $60^{\circ}00'14''\text{E}$).

Район исследований находится в таежной зоне, на границе подзон южной и средней тайги. Климат района умеренно-континентальный, по теплообеспеченности характеризуется как прохладный, по влагообеспеченности – как влажный. Среднегодовая температура воздуха $+0,7^{\circ}\text{C}$, среднеиюльская $+17,7^{\circ}\text{C}$, среднеянварская $-16,7^{\circ}\text{C}$. При среднем годовом количестве осадков 673 мм за теплый период (апрель–октябрь) выпадает 489 мм. Почвенный покров Туинского округа представлен подзолистыми почвами, среди которых встречаются небольшие островки болотных. Округ расположен в таежной зоне, на переходе средней тайги в южную. Здесь преобладают хвойные леса (*P. obovata*, *Abies sibirica* Ledeb., *P. sibirica*, *Pinus sylvestris* L.) с мелколиственными (*Betula* sp.) породами. Подлесок редкий, бедный по составу (*Sorbus aucuparia* subsp. *sibirica* (Hedl.) Krylov, *Juniperus* sp., *Rosa* sp.) [20].

Объект исследований – *Pinus sibirica*. Это пластический вид, отличается устойчивостью к морозу и малотребовательностью к теплу. При достаточной атмосферной и почвенной влажности произрастает почти на всех типах грунта, но предпочитает хорошо дренированные, плодородные почвы, содержащие в своем составе известье. Вид теневыносливый, но плохо переносящий сильное затенение в зрелом возрасте [1; 5; 6].

Модельные деревья *P. sibirica* отбирали в естественном лесном массиве с преобладанием *P. obovata*, *A. sibirica*, с участием *P. sibirica*, *L. sibirica*, *Betula pubescens* Ehrh., сомкнутость крон 0,7–0,8. Травяно-кустарничковый ярус разрежен, пятнами встречались *Vaccinium vitis-idaea* L., *Orthilia secunda* (L.) House, *Pyrola rotundifolia* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth и др. [24]. Площадь обследованной территории составляет 300 м².

Для оценки влияния возраста хвои на исследуемые показатели была собрана хвоя 2, 3 и 4-го года с 5 деревьев 30–35-летнего возраста с южной экспозиции. Длину хвои измеряли на свежесобранной хвое, для чего хвоинки (30 шт) выкладывали на миллиметровую бумагу и фотографировали. Далее на фотографиях проводили измерения длины (с точностью до сотых миллиметра) с использованием специализированной системы анализа изображений SIAMS MesoPlant («СИАМС», г. Екатеринбург). Для изучения анатомического строения хвою ($n=30$) фиксировали в 70% растворе этилового спирта. Поперечные срезы получали при помощи замораживающего микротома МЗ-2 и помещали в глицерин. Измерение анатомических показателей, таких как площадь поперечного сечения среза хвои, толщину эпидермы, гиподермы и энтодермы, площадь смоляных ходов, проводили с использованием светового микроскопа и специализированной системы анализа изображений SIAMS MesoPlant.

Для определения содержания фотосинтетических пигментов навеску хвои (50 мг) гомогенизировали в 80% ацетоне. Измерения ацетоновых вытяжек пигментов проводили спектрофотометрическим методом при длинах волн 470, 624, 647 и 663 нм на приборе APEL (PD-303UV) (Австрия) и рассчитывали по стандартной методике Н.К. Lichtenthaler [27].

Определение содержания низкомолекулярных антиоксидантов и уровня перекисного окисления липидов (ПОЛ) проводили на образцах хвои, предварительно фиксированных в жидкому азоте. Анализ биохимических показателей проводили в 4-кратной биологической и 5 аналитических повторностях. Количество продуктов ПОЛ определяли по реакции малонового диальдегида (МДА) с тиобарбитуровой кислотой (ТБК). Измерение оптической плотности проводили при длинах волн 532 и 600 нм [29]. Содержание свободного пролина определяли спектрофотометрически по модифицированной методике [7] с использованием ацидинингидринового реагента. Оптическую плотность окрашенного комплекса измеряли на спектрофотометре при длине волны 520 нм.

Оценку концентрации фенолов, флавоноидов проводили с использованием экстракта мелкоизмельченной хвои после суточного (24 часа) настаивания в 80% этаноле. Измерение и расчет содержания общего количества фенолов в образцах проводили по галловой кислоте с использованием реагента Фолина-Чокалтеу согласно методике [28]. Количество флавоноидов рассчитывали по рутину, с использованием хлорида алюминия, согласно методике [23]. Для определения содержания аскорбиновой кислоты использовали методику Е.Ж. Hewitt [26]. Навеску хвои растирали в смеси НРО₃ и Na₃PO₄ (в соотношении 3:2). Дальнейшие измерения экстрактов проводили спектрофотометрически при длине волны 265 нм. Расчет всех биохимических показателей проводили на сухой вес хвои (с.в.).

Оценку содержания низкомолекулярных антиоксидантов в хвое проводили в 5-кратной биологической повторности (на усредненной пробе хвои) и 3–5 аналитических

повторностях. Полученные данные обрабатывали статистически с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel и StatSoft STATISTICA 12. Достоверность различий полученных результатов проводили по непараметрическому критерию Манна–Уитни (при $p < 0,05$). В таблицах 1, 2 и на рисунке 1 представлены средние значения и их стандартные ошибки.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследования показали, что длина разновозрастной хвои *P. sibirica* варьирует от $88,83 \pm 1,44$ мм (4-летняя хвоя) до $99,75 \pm 1,62$ мм (3-летняя) (табл. 1). Известно, что морфологические параметры хвои голосеменных во многом зависят от комплекса экологических факторов [10; 14; 18]. Большое влияние на длину хвои оказывают погодные условия как во время заложения почек, так и в период ее роста [14]. Погодные условия (общее количество осадков и суммы среднесуточных температур в вегетационный период) существенно варьировали, о чем свидетельствуют различные значения гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) в районе исследований (2019 г. – ГТК = 1,5; 2021 г. – ГТК = 0,7) [3].

Таблица 1

**Анатомо-морфологические показатели разновозрастной хвои *P. sibirica*
в условиях Среднего Урала**

Параметры	Возраст хвои		
	2 года	3 года	4 года
Длина хвои, мм	$92,21 \pm 1,73$ a	$99,75 \pm 1,62$ b	$88,83 \pm 1,44$ a
Площадь поперечного сечения хвои, $\times 10^4$ мкм ²	$55,61 \pm 0,89$ b	$53,83 \pm 1,53$ b	$47,31 \pm 1,10$ a
Площадь мезофилла, $\times 10^4$ мкм ²	$38,58 \pm 0,58$ b	$37,67 \pm 1,05$ b	$33,53 \pm 0,89$ a
Площадь центрального цилиндра, $\times 10^4$ мкм ²	$11,12 \pm 0,19$ b	$9,70 \pm 0,23$ ab	$8,21 \pm 0,12$ a
Толщина энтодермы, мкм	$33,20 \pm 0,70$ a	$36,56 \pm 0,61$ b	$37,26 \pm 0,46$ b
Площадь смоляных ходов, мкм ²	$274,51 \pm 4,70$ a	$287,91 \pm 5,97$ b	$265,48 \pm 4,72$ a
Толщина эпидермы, мкм	$13,82 \pm 0,24$ a	$14,48 \pm 0,22$ a	$13,56 \pm 0,23$ a
Толщина гиподермы, мкм	$10,59 \pm 0,18$ a	$11,72 \pm 0,20$ a	$11,11 \pm 0,18$ a

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

Анализ анатомического строения разновозрастной хвои *P. sibirica* показал, что по мере увеличения возраста хвои происходит незначительное уменьшение площади ее поперечного сечения, площади мезофилла и центрального цилиндра. По большинству показателей различия 4- и 2-летней хвои *P. sibirica* статистически значимы. Снижение площади поперечного сечения хвои и площади мезофилла, в среднем, составило 17,5%, площади центрального цилиндра – 35,4%. Максимальная площадь смолоносной системы отмечена для хвои 3-го года. При этом толщина покровных тканей хвои в процессе возрастного развития практически не изменяется (табл. 1).

Описанные выше тенденции согласуются с литературными данными [9; 14] и объясняются началом процесса старения листового аппарата, который нередко сопровождается редукцией общей ассимилирующей поверхности хвои, начиная с 4-летнего возраста.

Анализ содержания фотосинтетических пигментов в хвое *P. sibirica* в процессе возрастного развития хвои показал относительную стабильность пула антенных пигментов.



При этом наблюдалось небольшое снижение концентрации хлорофилла *a* (на 16%) у 4-летней хвои по сравнению с 2-летней, что привело к закономерному снижению концентрации зеленых пигментов в хвое и уменьшению соотношения хлорофилла *a* к сумме антенных пигментов (Хла/Хл b +каротиноиды) на 10% и 16%, соответственно (табл. 2). Согласно литературным данным, максимальное содержание хлорофиллов в хвое *P. sibirica* отмечено для хвои 2-го и 3-го года жизни, что согласуется с полученными нами данными [2].

Таблица 2

Содержание пигментов в разновозрастной хвое *P. sibirica* в условиях Среднего Урала

Показатели	Возраст хвои		
	2 года	3 года	4 года
Хла, мг/г с.в.	1,12±0,04b	0,99±0,02b	0,94±0,03a
Хл b , мг/г с.в.	0,42±0,05a	0,47±0,01a	0,44±0,02a
Хла+ b , мг/г с.в.	1,54±0,01b	1,46±0,02ab	1,38±0,05a
Каротиноиды, мг/г с.в.	0,44±0,03a	0,44±0,02a	0,44±0,02a
Хла+ b /каротиноиды	3,58±0,4a	3,36±0,11a	3,17±0,09a
Хла/Хл b	2,35±0,11a	2,12±0,09a	2,13±0,06a
Хла/Хл b +каротиноиды	1,33±0,12b	1,10±0,04ab	1,07±0,02a

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

Соотношение форм хлорофиллов (Хла/Хл b) характеризует потенциальную фотосинтетическую активность листового аппарата и в норме находится в диапазоне 2–3. В литературе отмечено относительное постоянство соотношения форм хлорофилла в хвое *P. sibirica* в процессе ее возрастного развития, что соотносится с полученными нами данными [11; 13; 14]. При этом отмечается, что в процессе старения хвои у *P. sibirica* повышается содержание каротиноидов [11; 14]. Наши исследования показали отсутствие достоверных отличий по показателю содержания в хвое каротиноидов и хлорофилла *b*.

Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) – индикаторная реакция повреждения клеточных мембран. Усиление процессов ПОЛ является одним из основных неспецифических механизмов защиты от повреждающего действия активных форм кислорода (АФК) в условиях окислительного стресса [22]. Сравнительный анализ уровня перекисного окисления липидов в разновозрастной хвое *P. sibirica* показал их достоверное увеличение по мере старения хвои. Так интенсивность ПОЛ в хвое 3-го и 4-го года, по сравнению с 2-летней, увеличилась в 1,9 и 2,1 раза соответственно (рис. 1, а). Данная тенденция говорит об усилении процессов накопления продуктов окисления липидов в хвое *P. sibirica* в процессе ее возрастного развития, что также было отмечено в литературе [11; 14].

Следствием усиления процесса ПОЛ в растениях является активация и интенсификация системы антиоксидантной защиты, которая предотвращает и устраняет последствия окислительного стресса. Одним из компонентов этой системы являются неферментативные низкомолекулярные соединения. В клетках растений низкомолекулярные антиоксиданты представлены очень широко. Большую и разнообразную группу представляют фенольные соединения, к числу которых относятся и

флавоноиды. Как правило, накопление фенольных соединений в растениях служит индикатором низкотемпературного стресса, дефицита воды и минерального питания. Флавоноиды – биологически активные соединения фенольной природы, которые играют важную роль в окислительно-восстановительных реакциях, защищают растительные ткани от избыточной солнечной радиации. Аккумуляция свободного пролина считается типичным ответом растения на воздействие различных негативных факторов окружающей среды [25]. Аскорбиновая кислота – витамин, который в клетках растений непосредственно вступает в реакции со свободно радикальными частицами, инактивируя их, и таким образом, снижает разрушительные последствия окислительного стресса [21].

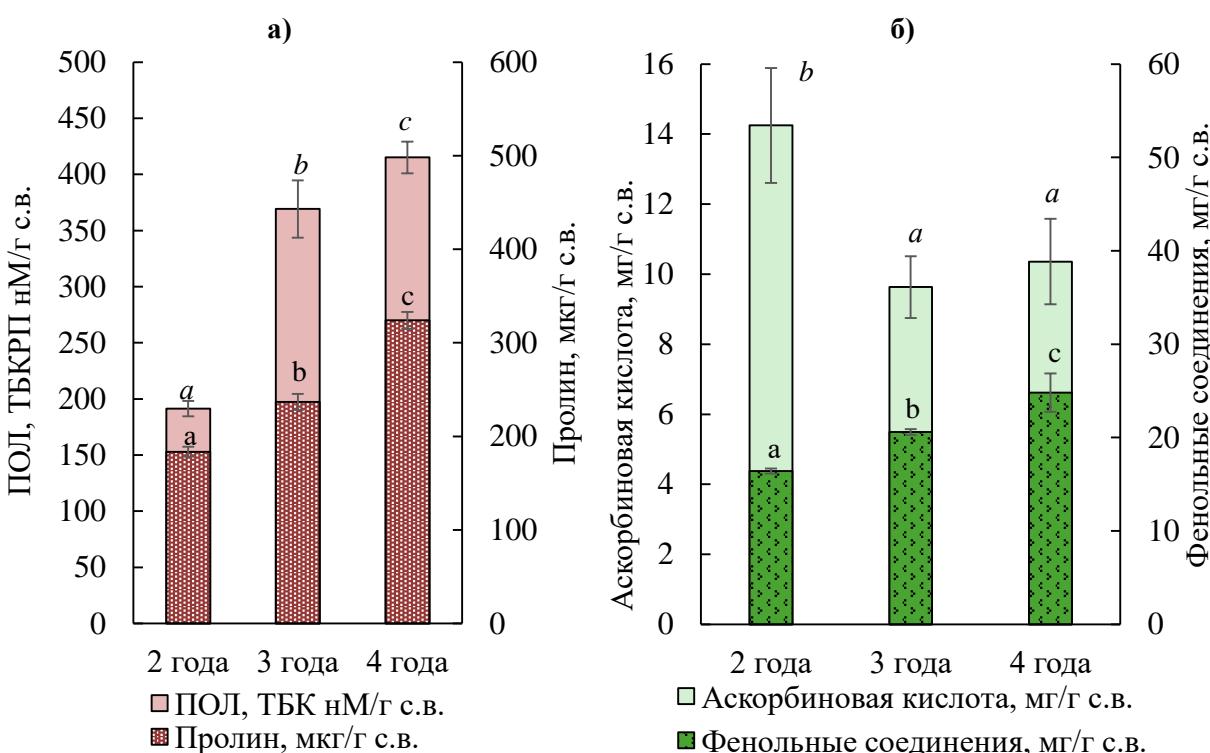


Рис. 1. Интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) и содержание пролина (а), аскорбиновой кислоты и фенольных соединений (б) в разновозрастной хвое *P. sibirica* в условиях Среднего Урала

На рисунке 1 представлены результаты анализа содержания низкомолекулярных антиоксидантов в разновозрастной хвое *P. sibirica*. Установлено, что общее содержание фенольных соединений к 4-му году жизни хвои увеличивается в 1,5 раза. Вероятно, повышенное накопление фенольных соединений связано с усилением с возрастом хвои процессов ПОЛ, отмеченным выше. В то же время максимальное содержание флавоноидов наблюдается в 2-летней хвое ($3,15 \pm 0,14$ мг/г с.в.). К 3-му году жизни хвои концентрация флавоноидов снижается на 15% ($2,75 \pm 0,15$ мг/г с.в.), к 4-му уже на 30% ($2,42 \pm 0,15$ мг/г с.в.).

Повышенное содержание флавоноидов в молодой хвое может положительно влиять на фотосинтетическую деятельность, защищая пигментный комплекс от избыточной инсоляции.

В процессе возрастного развития хвои также наблюдается увеличение содержания свободного пролина (рис. 1). В 3-летней хвое по сравнению с 2-летней – на 29%, в 4-летней по сравнению с 2-летней – на 76,5%. По-видимому, такая динамика изменения данного показателя может быть связана со снижением обводненности хвои и, как следствие, усыханием ее в процессе старения.

Максимальное содержание витамина С выявлено в 2-летней хвое ($14,25 \pm 1,64$ мг/г с.в.), что в 1,4 раза выше, чем в 3 и 4-летней хвое *P. sibirica* (рис. 1), что согласуется с литературными данными, в которых отмечено увеличение накопления аскорбиновой кислоты в молодой хвое [19].

Таким образом, однонаправленных изменений в накоплении низкомолекулярных антиоксидантов в процессе возрастного развития хвои *P. sibirica* не отмечено.

Заключение. Исследование разновозрастной хвои *P. sibirica*, произрастающей на Среднем Урале, показало, что с увеличением возраста хвои наблюдалось уменьшение таких анатомо-морфологических показателей, как площадь поперечного сечения хвои, площади мезофилла и центрального цилиндра.

При этом молодая (2-летняя) хвоя характеризовалась высокой фотосинтетической активностью, т.к. содержала максимальное количество фотосинтетических пигментов, а также аскорбиновой кислоты. В более зрелой (4-летней) хвое усиливались процессы окисдации липидов, о чем свидетельствовало увеличение концентрации продуктов ПОЛ, и, как следствие, активизировалась система антиоксидантной защиты, что проявлялось в увеличении содержания фенольных соединений и свободного пролина.

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

Литература

1. Бех И.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М. Кедр – жемчужина Сибири. Томск: Печатная мануфактура, 2009. 49 с.
2. Варлам И.И., Русак С.Н., Казарцева К.В. Сезонные изменения пигментного состава *Pinus sibirica* в условиях урбоэкосистем северных территорий (на примере города Сургута) // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 1. С. 82-86. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-11082>.
3. Глазырина М.А., Филимонова Е.И., Лукина Н.В., Кордюк А.А. Динамика ценопопуляционных показателей *Eriophyes palustris* (L.) Crantz, произрастающего в техногенном местообитании // Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы II Международной научно-практической конференции. Книга 2. (г. Киров, 23–24 апреля 2025 г.). Киров: Вятский государственный университет, 2025. С. 236-241.
4. Добровольский В.К. Кедровые леса СССР и их использование. Москва: Лесная промышленность, 1964. 186 с.
5. Игнатенко М.М. Сибирский кедр (биология, интродукция, культура). М.: Наука, 1988. 159 с.
6. Ипатов Л.Ф. Кедр на Севере. Архангельск: Музей леса, 2011. 411 с.
7. Калинкина Л.Г., Назаренко Л.В., Гордеева Е.Е. Модифицированный метод выделения свободных аминокислот для определения на аминокислотном анализаторе // Физиология растений. 1990. Т. 37, № 3. С. 617-621.

8. Плаксина И.В., Судачкова Н.Е., Романова Л.И., Милютина И.Л. Сезонная динамика фенольных соединений в лубе и хвое сосны обыкновенной и кедра сибирского в посадках различной густоты // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 103-108.
9. Полякова О.И. Морфолого-анатомические особенности хвои у семенного и разновозрастного вегетативного потомства мутационных «Ведьминых метел» *Pinus sibirica* Du Tour // Лесной вестник. Forestry bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 51-57. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-51-57>.
10. Рудник Т.И., Зотикова А.П., Бендер О.Г. Морфоанатомические особенности хвои экотипов кедра сибирского в условиях юга Томской области // Вестник ТГУ. 2007. № 300. С. 228-230.
11. Русак С.Н., Варлам И.И., Кравченко И.В., Казарцева К.В. Фотосинтетические пигменты сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в биоиндикации условий окружающей среды // Проблемы региональной экологии. 2018. № 3. С. 6-11. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-13006>.
12. Семериков Л.Ф., Ипполитов В.В. Резерваты кедра сибирского на Урале // Растильность в условиях техногенных ландшафтов Урала: сб. науч. трудов. Свердловск: УрО РАН, 1989. С. 45-55.
13. Собчак Р.О., Григорьев Ю.С. Биоиндикационное значение флуоресценции хлорофилла некоторых древесно-кустарниковых растений в зимний период // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14, № 1. С. 53-59.
14. Собчак Р.О., Зотикова А.П. Влияние условий высокогорья на анатомо-физиологические показатели хвои сосны сибирской // Вестник ТГУ. 2009. № 326. С. 200-202.
15. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Донцов А.С. Комплексный анализ хвои ели сибирской в условиях техногенной среды г. Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2014. Т. 32, № 1-2. С. 43-45.
16. Титов Е.В. Кедр – царь сибирской тайги. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2007. 152 с.
17. Усольцев В.А., Крудышев В.В. Об экологии и географии кедра сибирского // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2011. № 28. С. 147-153.
18. Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П. Анатомо-морфологические и биохимические характеристики *Pinus sylvestris* L. на отвалах месторождения тальк-магнезита // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 46-55. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/04>.
19. Шавнин С.А., Юсупов И.А., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю., Марина Н.В. Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне локального теплового воздействия // Известия вузов. Лесной журнал. 2023. № 2. С. 38-57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-38-57>.
20. Шакиров А.В. Физико-географическое районирование Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 617 с.
21. Akram N.A., Shafiq F., Ashraf M. Ascorbic Acid-A Potential Oxidant Scavenger and Its Role in Plant Development and Abiotic Stress Tolerance // Front Plant Sci. 2017. V. 8, Article 613. P.1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00613>.
22. Anjum N.A., Sofo A., Scopa A., Roychoudhury A., Gill S.S., Iqbal M., Lukatkin A.S., Pereira E., Duarte A.C., Ahmad I. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants // Environmental Science and Pollution Research. 2015. № 22. P. 4099-4121. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>.

23. Chang C., Yang M., Wen H., Chern J. Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods // Journal of Food Drug Analysis. 2002. V. 10, № 15. P. 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.
24. Chukina N., Lukina N., Glazyrina M., Filimonova E., Uchaev A., Nekrasova O. Anatomical, morphological and biochemical features of *Pinus sibirica* needles on recultivated and non-recultivated ash dump sites in the Middle Urals // BIO Web of Conferences. 2024. V. 128, 00004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412800004>.
25. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. Plant Signal Behav. 2012. 7(11):1456-1466. <https://doi.org/10.4161/psb.21949>.
26. Hewitt E.J., Dickes G.J. Spectrophotometric measurements on ascorbic acid and their use for the estimation of ascorbic acid and dehydroascorbic acid in plant tissues // Biochemical Journal. 1961. V. 78, № 2. P. 384-391.
27. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in enzymology. 1987. V. 148, № 4. P. 350-382.
28. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent // Methods in Enzymology. 1999. V. 299, № 8. P. 152-178.
29. Uchiyama M., Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test // Anal. Biochem. 1978. V. 8, № 6. P. 287-297.

References

1. Bex, I.A., Krivecz, S.A., & Bisirova, E`M. (2009). *Kedr – zhemchuzhina Sibiri*. Tomsk: Pechatnaya manufaktura. (in Russ.).
2. Varlam, I.I., Rusak, S.N., & Kazarceva, K.V. (2019). Sezonny`e izmeneniya pigmentnogo sostava *Pinus sibirica* v usloviyakh urbo`kosistem severny`x territorij (na primere goroda Surguta). *E`kologiya urbanizirovanny`x territorij*, 1, 82-86. (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-11082>.
3. Glazyrina, M.A., Filimonova, E.I., Lukina, N.V., & Kordyuk, A.A. (2025). Dinamika cenopopulyacionny`x pokazatelej *Epipactis palustris* (L.) Crantz, proizrastayushhego v texnogennom mestoobitanii. *E`kologiya rodnogo kraja: problemy` i puti ix resheniya: materialy` II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (ss. 236–241). Kirov: Vyatskij gosudarstvenny`j universitet. (in Russ.).
4. Dobrovolskij, V.K. (1964). *Kedrovyye lesa SSSR i ix ispol`zovanie*. Moskva: Lesnaya promy`shlennost`. (in Russ.).
5. Ignatenko, M.M. (1988). *Sibirskij kedr (biologiya, introdukciya, kul`tura)*. M.: Nauka. (in Russ.).
6. Ipatov, L.F. (2011). *Kedr na Severe*. Arxangel`sk: Muzej lesa. (in Russ.).
7. Kalinkina, L.G., Nazarenko, L.V., & Gordeeva, E.E. (1990). Modificirovanny`j metod vy`deleniya svobodny`x aminokislot dlya opredeleniya na aminokislotnom analizatore. *Fiziologiya rastenij*, 37(3), 617-621. (in Russ.).
8. Plaksina, I.V., Sudachkova, N.E., Romanova, L.I., & Milyutina, I.L. (2009). Sezonnaya dinamika fenol`ny`x soedinenij v lube i xvoe sosny` oby`knovennoj i kedra sibirskogo v posadkax razlichnoj gustoty`. *Ximiya rastitel`nogo sy`r`ya*, 1, 103-108. (in Russ.).
9. Polyakova, O.I. (2020). Morfologo-anatomicheskie osobennosti xvoi u semennogo i raznovozrastnogo vegetativnogo potomstva mutacionny`x «Ved`miny`x metel» *Pinus sibirica* Du Tour. *Forestry bulletin*, 24(6), 51-57. (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-51-57>.
10. Rudnik, T.I., Zotikova, A.P., & Bender, O.G. (2007). Morfoanatomicheskie osobennosti xvoi e`kotipov kedra sibirskogo v usloviyakh yuga Tomskoj oblasti. *Vestnik TGU*, 300, 228-230. (in Russ.).

11. Rusak, S.N., Varlam, I.I., Kravchenko, I.V., & Kazarceva, K.V. (2018). Fotosinteticheskie pigmenty` sosny` sibirskoj (*Pinus sibirica* Du Tour) v bioindikacii uslovij okruzhayushhej sredy`. *Problemy` regional`noj e`kologii*, 3, 6-11. (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-13006>.
12. Semerikov, L.F., & Ippolitov, V.V. (1989). Rezervaty` kedra sibirskogo na Urale. *Rastitel`nost` v usloviyah texnogenny`x landshaftov Urala: sb. nauch. trudov*. Sverdlovsk: UrO RAN. (in Russ.).
13. Sobchak, R.O., & Grigor`ev, Yu.S. (2007). Bioindikacionnoe znachenie fluorescencii xlorofilla nekotory`x drevesno-kustarnikovy`x rastenij v zimnjij period. *Sibirskij e`kologicheskij zhurnal*. 14(1), 53-59. (in Russ.).
14. Sobchak, R.O., & Zotikova, A.P. (2009). Vliyanie uslovij vy`sokogor`ya na anatomo-fiziologicheskie pokazateli xvoi sosny` sibirskoj. *Vestnik TGU*, 326, 200-202. (in Russ.).
15. Sunczova, L.N., Inshakov, E.M., & Donczov, A.S. (2014). Kompleksny`j analiz xvoi eli sibirskoj v usloviyah texnogennoj sredy` g. Krasnoyarska. *Xvojny`e boreal`noj zony`*, 32(1-2), 43-45. (in Russ.).
16. Titov, E.V. (2007). *Kedr – czar` sibirskoj tajgi*. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvenny`j lesotexnicheskij universitet im. G.F. Morozova. (in Russ.).
17. Usol`cev, V.A., & Krudy`shev, V.V. Ob e`kologii i geografii kedra sibirskogo (2011). *Aktual`ny`e problemy` lesnogo kompleksa*, 28, 147-153. (in Russ.).
18. Chukina, N.V., Lukina, N.V., Filimonova, E.I., Glazyrina, M.A., & Uchaev, A.P. (2025). Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Pinus sylvestris* L. on the Talc-Magnezite Deposit Dumps. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 46-55. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/04>.
19. Shavnin, S.A., Yusupov, I.A., Montile, A.A., Golikov, D.Yu., & Marina, N.V. (2023). Sezonnaya dinamika soderzhaniya komponentov antiokislitel`noj sistemy` xvoi sosny` oby`knovennoj (*Pinus sylvestris* L.) v zone lokal`nogo teplovogo vozdejstviya. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2, 38-57. (in Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-38-57>.
20. Shakirov, A.V. (2011). *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Urala*. Ekaterinburg: UrO RAN. (in Russ.).
21. Akram, N.A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2017). Ascorbic Acid-A Potential Oxidant Scavenger and Its Role in Plant Development and Abiotic Stress Tolerance. *Front Plant Sci.*, 8(613), 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00613>.
22. Anjum, N.A., Sofo, A., Scopa, A., Roychoudhury, A., Gill, S.S., Iqbal, M., Lukatkin, A.S., Pereira, E., Duarte, A.C., & Ahmad, I. (2015). Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4099-4121. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>.
23. Chang, C., Yang, M., Wen, H., & Chern, J. (2002). Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods. *Journal of Food Drug Analysis*, (10), 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.
24. Chukina, N., Lukina, N., Glazyrina, M., Filimonova, E., Uchaev, A., & Nekrasova, O. (2024). Anatomycal, morphological and biochemical features of *Pinus sibirica* needles on recultivated and non-recultivated ash dump sites in the Middle Urals. *BIO Web of Conferences*, 128, 00004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412800004>.
25. Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M.N., Wani, A.S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signal Behav*, 7(11), 1456-1466. <https://doi.org/10.4161/psb.21949>.
26. Hewitt, E.J., & Dickes, G.J. (1961). Spectrophotometric measurements on ascorbic acid and their use for the estimation of ascorbic acid and dehydroascorbic acid in plant tissues. *Biochemical Journal*, 78(2), 384-391.



27. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*, 148(4), 350-382.
28. Singleton, V.L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299(8), 152-178.
29. Uchiyama, M., & Mihara, M. (1978). Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. *Anal. Biochem*, 8(6), 287-297.

дата поступления: 24.09.2025

дата принятия: 29.10.2025

© Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., 2025

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСНОВНЫХ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ГИБРИДНОЙ ФОРМЫ ЕЛЕЙ *PICEA ABIES* И *P. OBOVATA* (PINACEAE)

M.N. Kazantseva, P.P. Popov, S.P. Arefyev

VARIABILITY OF THE MAIN SYSTEMATIC FEATURES OF THE HYBRID SHAPE OF FIRS *PICEA ABIES* AND *P. OBOVATA* (PINACEAE)

Аннотация. Работа посвящена изучению индивидуальной и географической изменчивости основных систематических признаков гибридной (промежуточной) формы елей европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и сибирской (*P. obovata* Ledeb.) – длины шишек и формы семенных чешуй. Ее актуальность определяется тем, что эти признаки у гибридных популяций ели изучены недостаточно и главным образом визуально-описательным путем. Основная методическая особенность данного исследования заключается в использовании метрических и математико-статистических приемов обработки большого исходного материала. Использован материал с 24 ключевых участков в районе распространения гибридной формы ели на территории России. Выборка шишек с каждого участка включала не менее 100 штук (по одной с дерева); общее число деревьев составило 4581 экземпляр. Анализ полученного материала показал, что, в популяциях гибридной формы елей *P. abies* и *P. obovata* сложились промежуточные параметры основных систематических признаков. Средняя длина шишек гибридной формы ели составляет 76(63–91) мм. Коэффициенты сужения (*coefficient of narrowing* – C_n) и вытянутости (*coefficient of projection* – C_p) верхней части семенных чешуй равны соответственно 45(36–54) и 52(47–71)%, их разность ($C_n - C_p$) находится в пределах от -16 до +23%. Индивидуальная (внутрипопуляционная) изменчивость этих признаков значительно выше географической. В межпопуляционной изменчивости показателей формы семенных чешуй и длины шишек имеется корреляция среднего уровня. Результаты исследования позволяют обосновать морфологогеографическую дифференциацию промежуточной формы ели на три группы в пределах общего района ее распространения, а также могут быть использованы для выделения более мелких таксонов гибридной формы елей *P. abies* и *P. obovata*. Учитывая наличие связи рассматриваемых параметров с количеством и качеством семян в шишках, полученные результаты могут быть

Abstract. The article is devoted to the study of individual and geographical variability of the main systematic traits of the hybrid (intermediate) form of European spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Siberian (*P. obovata* Ledeb.) - the length of the cones and the shape of the seed scales. The relevance of the study is determined by the fact that these traits in hybrid populations of spruce have been insufficiently studied and mainly by visual-descriptive means. The main methods of this study are the use of metric and mathematical-statistical techniques for processing large source material. The material was collected at 24 sites in the area of distribution of the hybrid form of spruce on the territory of Russia. The sample of cones from each plot included at least 100 pieces (one from a tree); the total number of trees was 4581 specimens. The analysis of the obtained material showed that intermediate parameters of the main systematic features were formed in the populations of the hybrid form of European and Siberian spruce. The average length of cones of a hybrid form of spruce is 76 (63–91) mm. The coefficients of narrowing (C_n) and projection (C_p) of the upper part of the seed scales are 45(36–54) and 52(47–71)%, respectively, their difference ($C_n - C_p$) is in the range from -16 to +23%. Individual (intrapopulation) variability of these traits is much higher than the geographical one. In the interpopulation variability of the parameters of the shape of the seed scales and the length of the cones, there is a correlation of the average level. The results of the study make it possible to substantiate the morphological and geographical differentiation of the intermediate form of spruce into three groups within the general area of its distribution, and can also be used to identify smaller taxa of the hybrid form of European and Siberian spruces. Given the relationship between the parameters under consideration and the quantity and quality of seeds in cones, the results obtained can be useful for practical forestry in the selection of the most promising forest-seed plots.



полезны для практического лесоводства при отборе наиболее перспективных лесосеменных участков.

Ключевые слова: *Picea abies*; *P. obovata*; гибридная форма ели; длина шишек; показатели формы семенных чешуй; изменчивость, корреляция.

Сведения об авторах: Казанцева Мария Николаевна, ORCID:0000-0002-1227-6720, mnkazantseva@yandex.ru; Попов Петр Петрович, ORCID: 0000-0002-0987-7402, ipospopov@mail.ru; Арефьев Станислав Павлович, ORCID:0000-0002-8621-9884, sp_arefyev@mail.ru. ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера, г. Тюмень, Россия

Keywords: *Picea abies*; *P. obovata*; hybrid shape of spruce; length of cones; indicators of seed scales shape; variability; correlation.

About the authors: Maria N. Kazantseva, ORCID:0000-0002-1227-6720, MNKazantseva@yandex.ru; Pyotr P. Popov, ORCID: 0000-0002-0987-7402, ipospopov@mail.ru; Stanislav P. Arefyev, ORCID:0000-0002-8621-9884, sp_arefyev@mail.ru. Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences RAS, Tyumen, Russia

Казанцева М.Н., Попов П.П., Арефьев С.П. Изменчивость основных систематических признаков гибридной формы елей *Picea abies* и *P. obovata* (Pinaceae) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 16-28. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/02>

Kazantseva, M.N., Popov, P.P., & Arefyev, S.P. (2025). Variability of the Main Systematic Features of the Hybrid Shape of Firs *Picea abies* and *P. obovata* (Pinaceae). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 16-28. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/02>

Введение

Феномен интровергессивной гибридизации видов древесных растений широко распространен и давно вызывает научный и практический интерес, определяемый их особой экологической и хозяйственной значимостью. В последние годы внимание к этому вопросу возросло в связи задачами сохранения популяционно-генетического разнообразия, в выявлении которого наряду с традиционными морфологическими методами большое значение приобрели методы молекулярно-генетические. Значительное внимание вызывает также оценка устойчивости разных популяционно-генетических форм деревьев к современным изменениям климата, особенно ощутимым в северных регионах, где основными эдификаторами лесной растительности являются хвойные виды деревьев. Современные исследования интровергессивной гибридизации хвойных [34; 27; 28; 30; 41], в частности видов елей (*Picea*) [29; 32; 35; 36; 42; 33; 40], показали генетическую специфику популяционно-географических форм хвойных, определяемых интровергессией, нередко имеющую сложную эволюционно-историческую природу. Показана также значительная роль интровергессии в сохранении генетического разнообразия хвойных в меняющихся условиях, в частности, повышенная устойчивость «промежуточных» межвидовых форм к наблюдаемым ныне изменениям климата. Вместе с тем, молекулярно-генетические исследования елей на территории России пока не имеют сколь-нибудь масштабного характера, актуальна дифференциация гибридных форм по генетически обусловленным морфологическим признакам.

Популяции гибридной (промежуточной или переходной) формы елей европейской (*Picea abies* (Linnaeus) H. Karsten, 1881) и сибирской (*Picea obovata* Ledebour, 1833) располагаются, главным образом, в российской части ареала [5; 15; 21; 31]. Впервые эта ель была описана на территории Финляндии в 1863 г. по заметно отличающейся форме верхней

части семенных (шишечных) чешуй отдельных особей под названием *fennica* (Regel) и *medioxima* (Nylander) [13; 22]. В.Л. Комаров [14] охарактеризовал ее в ранге вида – ель финская (*Picea fennica* Regel). В дальнейшем она так и называлась (*Picea fennica* (Regel) Kom.) [4; 16; 21], хотя не все систематики были согласны с ее видовым статусом. Наиболее полно и достаточно конкретно условные границы распространения гибридной формы ели в пределах России указал Л.Ф. Правдин [39]. По его данным юго-западная граница ее проходит примерно от Санкт-Петербурга, западнее Москвы к южной границе ареала, северо-восточная – от восточного берега Чешской губы к Сыктывкару, Перми и далее к южной границе ареала. Район распространения гибридных популяций ели, выделенный с использованием метрических приемов изучения морфологии семенных чешуй, в основном тот же, но границы проходят несколько иначе [19]. Леса, образованные гибридной формой ели, распространены в центральной части Европейской России, они имеют большое хозяйственное и экологическое значение [1; 6; 24; 26]. Гибридные, формы-особи, характеризуются многими авторами давно (см. обзор Л.В Орловой, А.А. Егорова [16]), но параметры признаков, их изменчивость до сих пор мало изучены и в основном визуально-описательным путем в отдельных регионах. Целью настоящей работы является изучение индивидуальной и географической изменчивости линейных параметров шишек и семенных чешуй гибридной формы елей европейской и сибирской на территории России на основе математико-статистического анализа.

Материал и методы

Исследования проведены в районе распространения гибридной формы елей *P. abies* и *P. obovata* [19; 21]. Здесь были выделены 3 группы (фенотипы) популяций ели, географическое расположение которых определено по преобладанию особей промежуточных фенотипов, оцениваемых на основе биометрических параметров семенных чешуй [19]: I – фенотип *P.emt.* (*Picea europaea-medioxima-medioxima*), II – фенотип *P.m.* (*Picea medioxima*), III – фенотип *P.mms.* (*Picea medioxima-medioxima-sibirica*) (рис. 1).

При сборе и обработке материалов для данной статьи использована апробированная методика [12] с использованием элементов многомерного математического анализа [7].

В ходе работ 2017–2020 гг. материал собран на 56 участках ельников. На каждом участке формировали выборку по 100 и более шишек средней длины (по одной с дерева). Для настоящего анализа взято 24 ключевых участка, наиболее равномерно распределенных по району исследований, всего на них собран 4581 экземпляр шишек. У шишек определяли длину (L_c – *Length of cones*), показатели формы семенных чешуй в виде коэффициентов сужения (C_n – *coefficient of narrowing*) и вытянутости (C_p – *coefficient of projection*) верхней части, их разность ($C_n - C_p$) [18], а также корреляционные зависимости между этими признаками с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Показатели определяли для каждой особи, выборки, по всей совокупности выборок, а в ее пределах по фенотипам (группам) популяций промежуточной формы ели.

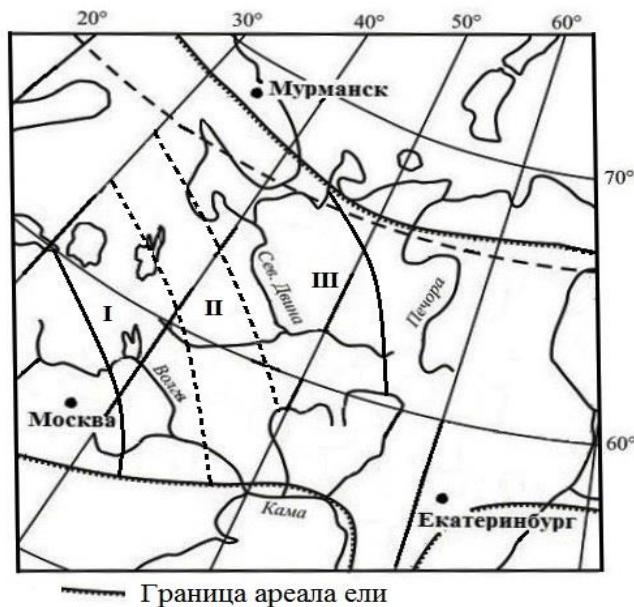


Рис. 1. Географическое распространение групп (фенотипов) популяций гибридной формы елей *Picea abies* и *P. obovata* в России. I – *P.emt.*, II – *P.m.*, III – *P.mms*.

Результаты и обсуждение

В индивидуальной (внутрипопуляционной) изменчивости показателей L_c , C_n и C_p наблюдается определенная закономерность (табл. 1). Диапазон показателя длины шишек составляет от 45–50 до 100–120 мм. Максимальное среднее для особи значение этого показателя превышает минимальное примерно в 2 раза, при коэффициенте вариации 13–14%. Таким же уровнем изменчивости характеризуется показатель C_p . Изменчивость показателя C_n несколько выше, различие определяется в 2,4 (2,33–2,45) раза, вариация его составляет 17–19%.

Таблица 1

Индивидуальная изменчивость показателей длины шишек и формы семенных чешуй в гибридных популяциях елей *Picea abies* и *P. obovata* в ключевых пунктах на территории России

№ пункта	n	L_c		C_n		C_p	
		X(min–max)	C_v	X(min–max)	C_v	X(min–max)	C_v
I фенотип популяций							
1	208	85(55–120)	14	38(22–57)	19	60(42–83)	15
2	120	80(55–110)	14	36(33–50)	19	59(47–75)	11
3	164	81(50–105)	13	40(23–59)	19	57(40–85)	14
4	175	88(55–115)	16	39(26–60)	18	57(40–85)	14
5	140	80(60–120)	14	39(24–63)	22	61(45–84)	14
6	150	91(53–122)	15	39(23–57)	18	57(40–73)	11
7	210	79(55–110)	14	39(20–60)	21	57(39–78)	14
8	200	78(50–110)	15	40(24–62)	20	56(37–81)	14
II фенотип популяций							
9	252	78(55–115)	14	42(23–67)	19	55(39–74)	12
10	167	73(50–105)	15	45(26–62)	19	57(39–72)	13
11	220	64(45–95)	15	47(30–68)	17	53(38–74)	12
12	130	80(55–110)	14	44(29–64)	19	54(40–70)	12

13	130	82(55–115)	14	44(27–63)	18	53(40–84)	14
14	135	82(60–115)	13	41(27–57)	16	53(35–71)	14
15	200	79(55–110)	13	44(25–62)	21	51(35–77)	14
16	150	76(50–106)	15	46(29–64)	16	52(38–72)	13
III фенотип популяций							
17	270	77(55–110)	12	47(31–69)	17	49(35–64)	14
18	160	67(45–90)	12	48(21–75)	21	50(36–69)	14
19	250	63(45–95)	16	50(23–73)	20	48(34–68)	14
20	200	73(45–105)	13	51(28–69)	17	50(36–67)	13
21	350	82(60–115)	14	46(20–70)	22	50(34–67)	13
22	300	82(60–115)	13	50(31–69)	15	50(37–69)	12
23	200	76(55–107)	13	52(27–75)	17	49(35–69)	11
24	100	70(48–95)	13	51(31–69)	17	50(37–67)	12

Примечание: здесь и в табл. 2–4: Пункты: 1 – Выборг, 2 – Рошино (Линдудловская роща), 3 – Сортавала, 4 – Ладва, 5 – Сонково, 6 – Данилов, 7 – Иваново, 8 – Арзамас, 9 – Реболы, 10 – Костомукша, 11 – Обозерский, 12 – Коноша, 13 – Никольск, 14 – Солигалич, 15 – Шарья, 16 – Киров, 17 – Казань, 18 – Кемь, 19 – Карпогоры, 20 – Зайцево, 21 – Верхняя Тойма, 22 – Афанасьево, 23 – Кудымкар, 24 – Оса; n – число особей в выборке, шт; L_c – длина шишечек, мм; C_n – коэффициент сужения, C_p – коэффициент вытянутости верхней части семенных чешуй; X – среднее значение признака, $min–max$ – крайние значения; C_v – коэффициент вариации, %.

Показатель C_n в популяциях фенотипов I и II меньше C_p , а в популяциях фенотипа III они близки по своей величине.

Коэффициент вариации $C_n–C_p$ составляет 39–41% при заметно большей его величине (33–50%) по отдельным популяциям. В индивидуальной изменчивости показателей C_n и C_p наблюдается отрицательная корреляция среднего уровня (табл. 2).

Таблица 2

Средние показатели формы семенных чешуй и их внутрипопуляционная корреляция в гибридных популяциях елей *Picea abies* и *P. obovata*

№ пункта	$C_n–C_p$		η C_n и C_p	R C_n и C_p
	X(min–max)	C_v		
I фенотип популяций				
1	–22(–55...+11)	44	0,645	–0,611
2	–23(–50...0)	50	0,580	–0,516
3	–17(–57...+24)	34	0,627	–0,616
4	–18(–45...+23)	48	0,520	–0,505
5	–22(–60...+20)	41	0,684	–0,679
6	–18(–41...+16)	49	0,523	–0,456
7	–18(–51...+15)	39	0,652	–0,647
8	–16(–54...+21)	38	0,702	–0,682
II фенотип популяций				
9	–13(–51...+24)	34	0,575	–0,563
10	–10(–41...+22)	45	0,575	–0,563
11	–6(–44...+27)	33	0,551	–0,543
12	–10(–39...+18)	45	0,630	–0,623
13	–9(–40...+18)	45	0,652	–0,647
14	–12(–40...+21)	40	0,580	–0,514
15	–7(–49...+28)	37	0,715	–0,706
16	–6(–36...+23)	31	0,611	–0,580
III фенотип популяций				
17	–2(–30...+27)	45	0,774	–0,755
18	–2(–42...+33)	38	0,652	–0,627

19	2(-40...+40)	35	0,719	-0,712
20	1(-39...+33)	34	0,681	-0,665
21	-4(-46...+33)	38	0,713	-0,702
22	0(-30...+30)	40	0,560	-0,548
23	3(-32...+38)	36	0,577	-0,516
24	1(-25...+32)	47	0,514	-0,431

Примечание: η – корреляционное отношение показателей C_n и C_p , R – коэффициент их корреляции.

По всем популяциям фенотипов (I, II, III) коэффициент отрицательной корреляции равен: -0,572(-0,422 ... -0,734); -0,573(-0,303 ... -0,706); -0,641(-0,431 ... -0,779) соответственно. Во всех случаях корреляция существенно не отличается от прямолинейной ($\eta^2-R^2 < 0,1$). Здесь, как видно, корреляция показателей C_n и C_p в популяциях фенотипа III в целом несколько выше. Возможно, это обусловлено более интенсивными процессами интродукции *P. abies* и *P. obovata* в восточной части зоны гибридизации. Внутрипопуляционная корреляция показателей C_n и C_p здесь в 1,25–1,40 выше, чем, например, у *P. obovata* в сибирской части ареала [12].

Географическая (межпопуляционная) изменчивость анализируемых показателей существенно отличается от индивидуальной (табл. 3). Во всей совокупности популяций средняя длина шишек равна 76 (63–91) мм, большее популяционное значение превосходит меньшее в 1,44 раза. В этом случае коэффициент вариации составляет 8 %. Распределение популяций по длине шишек не отличается от нормального (рис. 2).

Таблица 3

**Географическая изменчивость средних показателей длины шишек
и формы семенных чешуй в популяциях разных фенотипов гибридной формы елей
Picea abies и *P. obovata* на территории России**

Фенотип популяций	N	X(min–max)			
		L_c	C_n	C_p	C_n-C_p
I–III	56	76(63–91)	45(36–54)	52(47–61)	-7(-23...+5)
I	13	82(77–91)	38(36–40)	58(56–61)	-20(-16...-23)
II	15	77(64–82)	43(40–47)	53(51–56)	-10(-6...-14)
III	28	73(63–81)	50(46–54)	49(47–51)	1(-5...+5)

Примечание: N – число выборок.

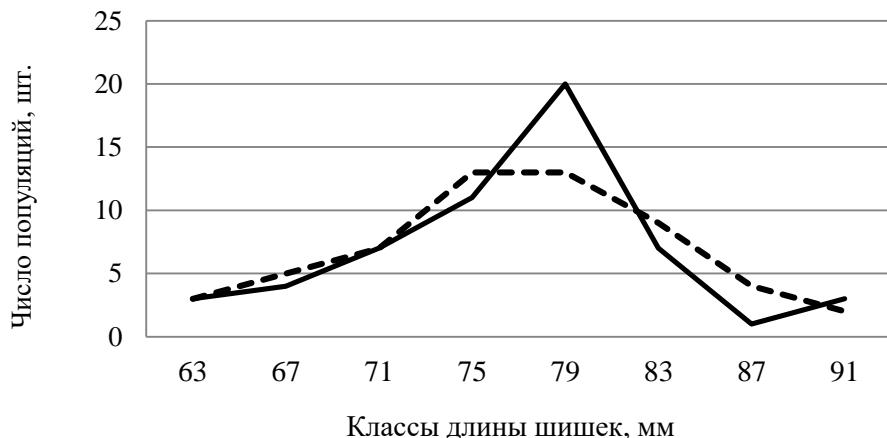


Рис. 2. Распределение 56 популяций гибридной формы елей *Picea abies* и *P. obovata* по классам средней длины шишек. Сплошная линия – эмпирические показатели, пунктирная – выравненные

По данным Л. Ф. Правдина [21] длина шишек гибридной формы ели составляет $85 \pm 6,5$ (то есть 78,5–91,5) мм. Как видно, среднее и нижнее значения имеют большие различия с нашими данными.

В популяциях фенотипа I средняя длина шишек составляет 82 мм, в популяциях фенотипа III она примерно на 12% меньше. Промежуточное значение длины шишек (77 мм) характерно для популяций фенотипа II. Размах изменчивости длины шишек в пределах фенотипа популяций примерно одинаков (63–82(91) мм). То есть, в пределах всех фенотипов встречаются популяции с довольно мелкими шишками (63–65 мм) и с относительно крупными (80–90 мм). Но во всех случаях географическая изменчивость признака в 2–3 раза ниже индивидуальной. Изменчивость показателей C_n и C_p между популяциями существенно меньше индивидуальной. При этом оказывается несколько больше вариация показателя C_n , чем вариация показателя C_p . Величина показателя $C_n - C_p$ в популяциях разных фенотипов варьирует от –20 до +1 %. Этот показатель, естественно, является наиболее вариабельным.

В географической изменчивости показателей имеется большое сходство, подтверждаемое высоким уровнем корреляции (табл. 4). Коэффициент отрицательной корреляции показателей C_n и C_p ($R = -0,90$; $C_n = -1,2466C_p + 110,93$; $C_p = -0,649C_n + 82,01$; ошибка уравнений равна 0,442) значительно выше внутрипопуляционного.

Таблица 4

Сходство (корреляция) в географической изменчивости показателей формы семенных чешуй и длины шишек в популяциях гибридной формы елей *Picea abies* и *P. obovata*

Признаки	η		R		K
	$\eta \pm S_\eta$	t	$R \pm S_r$	t	
C_n и C_p	$0,934 \pm 0,0488$	19,14	$-0,900 \pm 0,0593$	18,18	0,062
C_n и L_c	$0,701 \pm 0,0971$	7,22	$-0,654 \pm 0,1029$	6,36	0,063
C_p и L_c	$0,629 \pm 0,1058$	5,94	$+0,598 \pm 0,1091$	5,48	0,038
$C_n - C_p$ и L_c	$0,677 \pm 0,1001$	6,76	$-0,674 \pm 0,1006$	6,70	0,040

Примечание. Число пар 56, $\eta \pm S_\eta$ – корреляционное отношение и его ошибка, $R \pm S_r$ – коэффициент корреляции и его ошибка, t – показатель достоверности, K($\eta^2 - R^2$) – показатель криволинейности связи. K_{0,05} = 0,1.

Межпопуляционная (географическая) корреляция (C_n , C_p и $C_n - C_p$) и длины шишек (L_c) среднего уровня ($R = 0,6$ – $0,7$): между L_c и C_n , $C_n - C_p$ она отрицательного направления, а между C_p и L_c положительного. Отсюда можно сделать вывод относительно географического изменения анализируемых признаков. Корреляции показателей длины шишек и формы семенных чешуй внутри популяций нет [25].

Наличие межпопуляционной (а по мнению некоторых авторов – и внутрипопуляционной) «связи» формы семенных чешуй с длиной шишек имеет практическое лесоводческое значение, поскольку с длиной шишек тесно связано количество и качество семян, которое влияет на рост деревьев в начальный период [2; 3; 9; 11; 17; 20; 23].

Гибридная форма елей *P. abies* и *P. obovata* характеризуется и рядом других признаков в основном промежуточного характера. Средняя масса 1000 полных семян составляет 4,5–5,5 г, число семядолей у всходов 7–7,5 шт. [18], относительная высота семенного потомства – 125(113–138) % в популяциях фенотипов I и II, а в популяциях фенотипа III – 100(88–



113) %. Показатель внутрипопуляционного разнообразия фенотипов при их 9-классной градации характеризуется повышенным (5,1–6) и высоким (6,1–7) уровнем [38]. На территории северо-запада России, где распространена промежуточная форма ели (главным образом в Карелии), оказывается повышенной частота аллеля $Gdh^{0.75}$ по сравнению с елями *P. abies* (Беловежская пуща) и *P. obovata* (Красноярск), а частота аллеля $Gpi^{0.80}$ повышенной относительно первой и существенно ниже относительно второй [10]. По мнению П.А. Волковой [8], ель в Карелии по морфологическим признакам не отличается от *P. obovata*, а по органельной ДНК – от *P. abies*. Повышенная изменчивость ели здесь, как она предполагает, обусловлена естественной гибридизацией *P. abies* и *P. obovata*.

Положение популяций гибридной формы ели относительно популяций *P. abies* из Украинского Закарпатья и *P. obovata* из Восточной Сибири, используемых в качестве «стандартных» [37], определяли по C_n и C_p через квадрат дистанции Махalanобиса (Squared Mahalanobis Distances) [7]. Для всей их совокупности он составляет 29,44 и 18,75, то есть в целом они ближе к *P. obovata*, чем к *P. abies*. По фенотипам популяций (I, II, III) соотношение этих показателей иное: 15,18 и 34,08; 25,02 и 22,54; 38,13 и 9,61 соответственно. Отсюда видно, что популяции фенотипа I ближе к *Picea abies*, а популяции фенотипа III к *P. obovata*. Популяции фенотипа II занимают примерно одинаковое положение относительно «стандартных» популяций елей *P. obovata* и *P. abies*. Потомство гибридной формы ели в испытательных (географических) посадках, судя по многочисленным данным, по крайней мере, для центральных районов европейской части России, отличается рядом преимуществ перед потомствами исходных елей, что весьма важно для лесоводства.

Заключение

В гибридных (переходных) популяциях елей *P. abies* и *P. obovata* на территории России наблюдаются промежуточные параметры основных систематических признаков – длины шишек и показателей формы семенных чешуй. Индивидуальная (внутрипопуляционная) изменчивость их значительно выше географической. В межпопуляционной изменчивости изученных показателей имеется значительное сходство, которое характеризуется средним уровнем корреляции. На всем протяжении полосы гибридных популяций, особенно в ее центральной части, интродукция прослеживается на градиенте «юго-запад – северо-восток», к северу полосы несколько усиливается широтный градиент интродукции, к югу – ее долготный градиент. Результаты исследования могут быть полезны для практического лесоводства, а также для решения вопросов систематики гибридной формы елей европейской и сибирской.

*Работа выполнена в рамках государственного задания: проект № 121041600045
НИР ТюмНЦ СО РАН.*

Литература

1. Атлас лесов СССР. М.: ГУГК, 1973. 222 с.
2. Бакшаева В.И. Перспективы селекции ели в Карелии // Лесоведение. 1970. № 1. С. 38-45.

3. Бакшаева В.И. Особенности роста потомства ели в зависимости от формы семенных чешуй шишек материнских деревьев // Сборник: Вопросы механизации и автоматизации работ в лесной промышленности. Петрозаводск, 1976. С. 105-108.
4. Бобров Е.Г. История и систематика рода *Picea* A. Dietr. // Новости систематики высших растений. 1971. Вып. 7. С. 5-40.
5. Бобров Е.Г. Интровергессивная гибридизация в роде *Picea* A. Dietr. // Труды Института экологии растений и животных УНЦ АН СССР. Свердловск. 1974. Вып. 90. С. 60-66.
6. Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука. Ленинградское издание 1978. 188 с.
7. Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. М.: КомпьютерПресс, 1998. 267 с.
8. Волкова П.А. Использование молекулярно-генетических данных для анализа миграционных путей сосудистых растений в Восточной Европе в позднеледниковые: автореферат дис. ... докт. биол. наук. Москва, 2015. 42 с.
9. Голубец М.А., Половников Л.И. Продуктивность еловых древостоев в зависимости от происхождения и систематической принадлежности ели (*Picea abies* (L.) Karst.) // Украинский ботанический журнал. 1973. Т. 30. № 4. С. 433-438.
10. Гончаренко Г.Г., Падутов В.Е. Популяционная и эволюционная генетика елей Палеарктики. Гомель: ИЛ НАНБ, 2001. 197 с.
11. Захарова К.В., Сейц К.С. Внутрипопуляционная фенотипическая дифференциация гибридных популяций *Picea abies* × *Picea obovata* (Pinaceae) в контрастных экотопических условиях // Ботанический журнал. 2011. Т. 96. № 6. С. 709-738.
12. Казанцева М.Н., Арефьев С.П., Попов П.П. Индивидуальная и географическая изменчивость шишек и формы семенных чешуй ели сибирской в сибирской части ареала // Лесоведение. 2019. № 3. С. 198–207. <https://doi.org/10.1134/S0024114819020037>.
13. Кеппен Ф. Географическое распространение хвойных деревьев в Европейской России и на Кавказе. СПб.: Изд-во Императорской Академии Наук, 1885. 634 с.
14. Комаров В.Л. Класс хвойные (Coniferales) / Флора СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. Т. 1. С. 130-195.
15. Коропачинский И.Ю., Милютин Л.И. Естественная гибридизация древесных растений. Новосибирск: Гео, 2006. 223 с.
16. Орлова Л.В., Егоров А.А. К систематике и географическому распространению ели финской (*Picea fennica* (Regel) Kom., Pinaceae) // Новости систематики высших растений. 2010. Т. 42. С. 5-23.
17. Пальцев А.М. Форма семенных чешуй географических экотипов ели разной продуктивности в Московской области // Лесоведение. 1989. № 2. С. 36-43.
18. Попов П.П. Ель на востоке Европы и в Западной Сибири: Популяционно-географическая изменчивость и ее лесоводственное значение. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение 1999. 169 с.
19. Попов П.П. Распространение особей промежуточной формы в популяциях елей европейской и сибирской // Сибирский лесной журнал. 2018. № 4. С. 13-19.
20. Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П. Индивидуальная и географическая изменчивость шишек *Picea obovata* в российской части ареала в связи с количеством семян в них // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 192-199. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-192-199>.
21. Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 200 с.
22. Регель Э. Русская дендрология. 2-е изд. Вып.1: Хвойные. СПб, 1883. 68 с.



23. Рыжова Н.В., Шутов В.В., Коренев И.А., Малышев В.А., Лебедев О.Ю. Морфология шишек и продуктивность ели в Костромской области // Лесоведение. 2003. № 5. С. 61-71.
24. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 335 с.
25. Тарханов С.Н. Популяционная изменчивость ели финской по форме семенных чешуй на севере Архангельской области // Лесоведение. 2019. № 3. С. 208-214.
26. Цепляев В.П. Леса СССР. М.: Сельхозиздат, 1961. 216 с.
27. Belokon M.M., Belokon Y.S., Petrova E.A., Vasilyeva G.V., Efimova A.P., Zakharov E.S., Goroshkevich S.N., Politov D.V. Ancient and modern hybridization of Siberian stone pine and dwarf Siberian pine in the south of Yakutia. Russian Journal of Genetics. 2022. No 58. P. 1287-1296.
28. Carvalho-Madrigal S., Sanín M.J. The role of introgressive hybridization in shaping the geographically isolated gene pools of wax palm populations (genus *Ceroxylon*) // Molecular Phylogenetics and Evolution. 2024. Vol. 193. April 2024. Article number: 108013. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2024.108013>.
29. De La Torre A.R., Wang T., Jaquish B., Aitken S.N. Adaptation and exogenous selection in a *Picea glauca* × *Picea engelmannii* hybrid zone: implications for forest management under climate change // New Phytologist, 2014, vol. 201 (2), pp. 687-699. <https://doi.org/10.1111/nph.12540>.
30. Karunarathne P., Zhou Q., Lascoux M., Milesi P. Hybridization mediated range expansion and climate change resilience in two conifers // Global Change Biology. 2024. Vol. 30(4), e17262.
31. Krutovskii K.V., Bergman F. Introgressive hybridization and phylogenetic relationships between Norway, *Picea abies* (L.) Karst. and Siberian, *Picea obovata* Ledeb., spruces studied by isozyme loci // Heridity. 1995. № 74. P. 464-480. <https://doi.org/10.1038/hdy.1995.67>.
32. Lafontaine de G., Prunier J., Gérardi S., Bousquet J. Tracking the progression of speciation: variable patterns of introgression across the genome provide insights on the species delimitation between progenitor-derivative spruces (*Picea mariana* × *P. rubens*) // Molecular Ecology. 2015. Vol., 24 (20), pp. 5229-5247. <https://doi.org/10.1111/mec.13377>.
33. Liu Y., Xiao W., Wang F., Wang Y., Dong Y., Nie W., & Jia Z. Adaptive divergence, historical population dynamics, and simulation of suitable distributions for *Picea meyeri* and *P. Mongolica* at the whole-genome level // BMC Plant Biology. 2024. Vol. 24(1), p.479.
34. Menon M., Bagley J.C., Page G.F.M., Whipple A.V., Schoettle A.W., Still C.J., Wehenkel C., Waring K.M., Flores-Renteria L., Cushman S.A. & Eckert A.J. Adaptive evolution in a conifer hybrid zone is driven by a mosaic of recently introgressed and background genetic variants // Communications Biology. 2021. Vol. 4. P. 1-14.
35. Nakvasina, E., Demina, N., Prozherina, N., & Demidova, N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European north of Russia // Central European Forestry Journal. 2019. № 65. P. 121-128.
36. Orlova L., Gussarova G., Glazkova E., Egorov A., Potokin A., & Ivanov S. Systematics and distribution of spruce species in the north-west of Russia // Dendrobiology. 2020. № 84. P. 12-29.
37. Popov P.P. Reference populations for discriminant analysis in the continuous range of Norway and Siberian spruces // Russian Journal of Ecology. 2012. Vol. 43, № 1. P. 13-18. <https://doi.org/10.1134/S1067413612010092>.
38. Popov P.P. Population structure in European and Siberian spruces according to their phenotypes // Russian Journal of Ecology. 2017. Vol. 48. № 5. P. 403-408. <https://doi.org/10.1134/S1067413617050101>.
39. Pravdin L.F., Rostotsev S.A. Norway spruce provenance experiments in the USSR // IUFRO Norway spruce meeting. Buharest. 1979. P. 85-99.

40. Reed-Métayer E., Depardieu C., Lenz P., Bousquet J., Perron M. Spruce hybrids show superior lifespan growth but intermediate response to climate stress compared to their ecologically divergent parental species // Forest Ecology and Management. 2025. Vol. 581(1), Article number: 122550. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122550>.
41. Tarusawa Y., Ito T. & Isagi Y. Population genetic structure reveals asymmetric hybridization between *Pinus pumila* and *P. parviflora* var. *Pentaphylla* in the Hakkoda Mountains, Northern Japan // Scientific Reports. 2025. Vol. 15, Article number: 37677. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21433-4>.
42. Zhou Q., Karunaratne P., Andersson-Li L., Chen C., Opgenoorth L., Heer K., Piotti A., Vendramin G.G., Nakvasina E., Lascoux M., Milesi P. Recurrent hybridization and gene flow shaped Norway and Siberian spruce evolutionary history over multiple glacial cycles // Molecular Ecology. 2024. Vol. 33(17):e17495. <https://doi.org/10.1111/mec.17495>.

References

1. *Atlas lesov SSSR* (1973). M.: GUGK, 222. (in Russ.).
2. Bakshaeva, V.I. (1970). Perspektivy selektsii eli v Karelii. *Lesovedenie*, 1, 38-45. (in Russ.).
3. Bakshaeva, V.I. (1976). Osobennosti rosta potomstva eli v zavisimosti ot formy semennykh cheshui shishek materinskikh derev'ev. V kn.: Voprosy mekhanizatsii i avtomatzatsii rabot v lesnoy promyshlennosti. Petrozavodsk. 105-108. (in Russ.).
4. Bobrov, E.G. (1971). Iстория i sistematika roda *Picea* A. Dietr. *Novosti sistematiki rasteniy*, 7, 5-40. (in Russ.).
5. Bobrov, E.G. (1974). Introgressivnaya gibridizatsiya v rode *Picea* A. Dietr. Sverdlovsk, *Trudy Instituta ekologii rastenii i zhivotnykh UNTS AN SSSR*, 90, 60-66. (in Russ.).
6. Bobrov, E.G. (1978). *Lesoobrszuyushchiye khvoynyye SSSR*. Leningrad, Nauka, 1978. 188 p. (in Russ.).
7. Borovikov, V.P. (1998). Populyarnoe vvedenie v programmu STATISTICA [Popular introduction to the STATISTICA program]. M., Komp'yuteRpress, 267. (in Russ.).
8. Volkova, P.A. (2015). Ispol'zovanie molekulyarnj-geneticheskikh dannykh dlya analiza migratsionnykh putei sosudistykh rastenii v Vostochnoi Eoripe v pozdnelednikov'e. Abstract of Doctor Biol. Sci. Diss, Moscow, 42. (in Russ.).
9. Golubets, M.A., & Polovnikov, L.I. (1973). Produktivnost' elovyh drevostoev v zavisimosti ot proishozhdeniya i sistematiceskoi prinadlezhnosti eli (*Picea abies* (L.) Karst.). *Ukrainskiy botanicheskiy zhurnal*, 30(4), 433-438. (in Russ.).
10. Goncharenko, G.G., & Padutov, V.E. (2001). *Populyatsionnaya i evolyutsionnaya genetika elei Palearktiki*. Gomel', IL NANB, 197. (In Russ.).
11. Zakharova, K.V., & Seits, K.S. (2011). Vnutripopulyatsionnaya fenotipicheskaya differentsistsiya gibridnykh populyatsii *Picea abies* × *Picea obovata* (Pinaceae) v kontrastnykh ekotopicheskikh usluviyakh. *Botanicheskii zhurnal*, 96(6), 709-738. (in Russ.).
12. Kazantseva, M.N., Arefyev, S.P., & Popov, P.P. (2019). Individual'naya i geograficheskaya izmenchivost' shishek i formy semennykh cheshuy yeli sibirskoy v sibirskoy chasti areala. *Lesovedeniye*, 3, 198–207. <https://doi.org/10.1134/S0024114819020037>. (in Russ.).
13. Keppen, F. (1885). *Geograficheskoe rasprostranenie khvoinykh derev'ev v Evropeiskoi Rossii i na Kavkaze*. SPb., Izd-vo Imperatorskoi Akademii Nauk, 634. (In Russ.).
14. Komarov, V.L. (1934). *Klass khvoinye (Coniferales) / Flora SSSR*. Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1, 130-195. (in Russ.).
15. Koropachinskii, I.Yu., & Milyutin, L.I. (2006). *Estestvennaya gibridizatsiya drevesnykh rastenii*. Novosibirsk, Geo, 223. (in Russ.).

16. Orlova, L.V., & Egorov, A.A. (2010). K sistematike i geograficheskoy rasprostranennosti yeli finskoy (*Picea fennica* (Regel) Kom., Pinaceae). *Novitates Systematicae Plantarum Vascularium*, 42, 5-23. (in Russ.).
17. Pal'tsev, A.M. (1989). Forma semennyh cheshui geograficheskikh ekotipov eli raznoi produktivnosti v Moskovskoi oblasti. *Lesovedenie*, 2, 36-43. (in Russ.).
18. Popov, P.P. (1999). *El' na vostoke Evropy i v Zapadnoi Sibiri: Populyatsionno-geograficheskay izmenchivost' i ee lesovodstvennoe znachenie*. Novosibirsk, Nauka, 169. (in Russ.).
19. Popov, P.P. (2018). Rasprostraneniye osobey promezhutochnoy formy v populyatsiyakh yeley pravitel'stva i sibirskoy. *Sibirskij Lesnoj Zurnal*, 4, 13-19. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180402>. (in Russ.).
20. Popov P.P., Kazantseva M.N., & Arefyev S.P. (2024). Individual'naya i geograficheskaya izmenchivost' shishek *Picea obovata* v rossiyskoy chasti areala v svyazi s vyrashchivaniyem semyan v nikh. *Theoretical and applied ecology*, 3, 192-199.. (in Russ.).
21. Pravdin, L.F. (1975). *El' evropeiskaya i el' sibirskaya v SSSR*. M., Nauka, 200. (in Russ.).
22. Regel', E. (1883) *Russkaya dendrologiya*, 2 izdaniye, vypusk 1: *Khvoinye*, St. Petersburg, 68. (in Russ.).
23. Ryzhova, N.V., Shutov, V.V., Korenev, I.A., Malyshev, V.A., & Lebedev, O.Yu. (2003). Morfologiya shihok i produktivnost' eli v Kostromskoi oblasti. *Lesovedenie*, 5, 61-71. (In Russ.).
24. Rysin, L. P., & Savel'eva, L.I. (2002). *Eloye lesa Rossii*. M., Nauka, 335. (in Russ.).
25. Tarkhanov, S.N. (2019). Populyatsionnaya izmenchivost' yeli finskoy po forme semennykh cheshuy na severe Arkhangelskoy oblasti. *Lesovedenie*, 3, 208-214. <https://doi.org/10.1134/S0024114819020116>. (in Russ.).
26. Tsepelyaev, V.P. (1961). *Lesa SSSR*. M., Sel'khozizdat, 216. (in Russ.).
27. Belokon, M.M., Belokon, Y.S., Petrova, E.A., Vasilyeva, G.V., Efimova, A.P., Zakharov, E.S., Goroshkevich, S.N., & Politov, D.V. (2022). Ancient and modern hybridization of Siberian stone pine and dwarf Siberian pine in the south of Yakutia. *Russian Journal of Genetics*. 58, 1287-1296.
28. Carvalho-Madrigal, S., & Sanín, M.J. (2024). The role of introgressive hybridization in shaping the geographically isolated gene pools of wax palm populations (genus *Ceroxylon*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 193. 108013. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2024.108013>.
29. De La Torre, A.R., Wang, T., Jaquish, B., & Aitken, S.N. (2014). Adaptation and exogenous selection in a *Picea glauca* × *Picea engelmannii* hybrid zone: implications for forest management under climate change. *New Phytologist*, 201 (2), 687-699. <https://doi.org/10.1111/nph.12540>.
30. Karunarathne, P., Zhou, Q., Lascoux, M., & Milesi, P. (2024). Hybridization mediated range expansion and climate change resilience in two conifers. *Global Change Biology*, 30(4), e17262.
31. Krutovskii, K.V., & Bergman, F. (1995). Introgressive hybridization and phylogenetic relationships between Norway, *Picea abies* (L.) Karst. and Siberian, *Picea obovata* Ledeb., spruces studied by isozyme loci. *Heridity*, 74. 464–480. <https://doi.org/10.1038/hdy.1995.67>.
32. Lafontaine, de G., Prunier, J., Gérardi, S., & Bousquet, J. (2015). Tracking the progression of speciation: variable patterns of introgression across the genome provide insights on the species delimitation between progenitor-derivative spruces (*Picea mariana* × *P. rubens*). *Molecular Ecology*, 24 (20), 5229-5247. <https://doi.org/10.1111/mec.13377>.
33. Liu, Y., Xiao, W., Wang, F., Wang, Y., Dong, Y., Nie, W., & Jia, Z. (2024). Adaptive divergence, historical population dynamics, and simulation of suitable distributions for *Picea meyeri* and *P. mongolica* at the whole-genome level. *BMC Plant Biology*, 24(1), 479.
34. Menon, M., Bagley, J.C., Page, G.F.M., Whipple, A.V., Schoettle, A.W., Still, C.J., Wehenkel, C., Waring, K.M., Flores-Renteria, L., Cushman, S.A., & Eckert, A.J. (2021). Adaptive evolution in a

conifer hybrid zone is driven by a mosaic of recently introgressed and background genetic variants. *Communications Biology*, 4, 1-14.

35. Nakvasina, E., Demina, N., Prozherina, N., & Demidova, N. (2019). Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) karst. and *P. Obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European north of Russia. *Central European Forestry Journal*, 65, 121-128.

36. Orlova, L., Gussarova, G., Glazkova, E., Egorov, A., Potokin, A., & Ivanov, S. (2020). Systematics and distribution of spruce species in the north-west of Russia. *Dendrobiology*, 84, 12-29.

37. Popov, P.P. (2012). Reference populations for discriminant analysis in the conntinuous range of Norway and Siberian spruces. *Russian Journal of Ecology*, 43(1), 13-18. <https://doi.org/10.1134/S1067413612010092>.

38. Popov, P.P. (2017). Population structure in European and Siberian spruces according to their phenotypes. *Russian Jorurnal of Ecology*, 48(5), 403–408. <https://doi.org/10.1134/S1067413617050101>.

39. Pravdin, L.F., & Rostotsev, S.A. (1979). Norway spruce provenance experiments in the USSR. IUFRO Norway spruce meeting. Buharest, 85-99.

40. Reed-Métayer, E., Depardieu, C., Lenz, P., Bousquet, J., & Perron, M. (2025). Spruce hybrids show superior lifespan growth but intermediate response to climate stress compared to their ecologically divergent parental species. *Forest Ecology and Management*, 581(1), 122550. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122550>.

41. Tarusawa, Y., Ito, T., & Isagi, Y. (2025). Population genetic structure reveals asymmetric hybridization between *Pinus pumila* and *P. parviflora* var. *Pentaphylla* in the Hakkoda Mountains, Northern Japan. *Scientific Reports*, 15, 37677. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21433-4>.

42. Zhou, Q., Karunaratne, P., Andersson-Li, L., Chen, C., Opgenoorth, L., Heer, K., Piotti, A., Vendramin, G.G., Nakvasina, E., Lascoux, M., & Milesi, P. (2024). Recurrent hybridization and gene flow shaped Norway and Siberian spruce evolutionary history over multiple glacial cycles. *Molecular Ecology*, 33(17):e17495. <https://doi.org/10.1111/mec.17495>.

дата поступления: 14.10.2025

дата принятия: 17.11.2025

© Казанцева М.Н., Попов П.П., Арефьев С.П., 2025

**ОБЩАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ
КАК ВАЖНЫЕ ФАКТОРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭКОБИОМОРФ
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ ГИДРОМАКРОФИТОВ**

B.F. Sviridenko

**TOTAL SALT CONTENT AND CHEMICAL COMPOSITION OF WATER AS IMPORTANT
FACTORS FOR THE STUDY OF ECOBIOMORPHES AND ECOLOGICAL NICHES OF
HYDROMACROPHYTES**

Аннотация. Цель работы заключается в обосновании подходов к дифференциации экобиоморф гидромакрофитов на основе количественных данных о галотолерантности. Изучение экобиоморф и экологических ниш гидромакрофитов является важной задачей современной гидроботаники. Большинство существующих систем жизненных форм водных макроскопических растений не содержит какую-либо количественную информацию об отношении гидромакрофитов к абиотическим факторам водной среды. Общая минерализация (соленость) наряду с общей жесткостью и активной реакцией воды – важные факторы, оказывающие значительное влияние на водные растения. Количественные диапазоны значений этих факторов, установленные в ходе лабораторного анализа проб воды из природных экотопов, наряду с биологоморфологическими характеристиками служат основой для дифференциации экобиоморф и экологических ниш каждого вида. На основе исследований, выполненных в период с 1984 г. по 2023 г., установлены количественные диапазоны минерализации воды для 247 видов гидромакрофитов Западно-Сибирской равнины. В составе водной макрофитной флоры этого региона выделены 2 флористических комплекса: пресноводный и соляноводный. Естественной экологической границей между данными комплексами является диапазон минерализации 8–25 г/дм³, получивший в гидробиологии название критической солености. Виды пресноводного комплекса, ограниченные в своем распространении минерализацией до 0,2 г/дм³, считаются ультрапресноводными, до 1 г/дм³ – типично пресноводными, до 3 г/дм³ – условно-пресноводными, до 5 г/дм³ – слабосолоновато-пресноводными, до 8 г/дм³ – среднесолоновато-пресноводными, до 25 г/дм³ – сильносолоновато-пресноводными. Виды, обитающие в диапазоне минерализации от 8 до 80 г/дм³, образуют

Abstract. The aim of the work is to substantiate approaches to the differentiation of ecobiomorphes of hydromacrophytes based on quantitative data on halotolerance. The study of ecobiomorphes and ecological niches of hydromacrophytes is an important problem of hydrobotany. Most of the existing systems of the life-forms of aquatic macrophytes do not contain any quantitative information on the relation of these plants to the abiotic factors of the aquatic environment. Total salt content along with total hardness and pH of water are important factors strongly affecting the aquatic plants. Quantitative ranges of these factors revealed upon laboratory tests of water samples from natural ecotopes along with their biological-morphological parameters form the basis for the differentiation of the ecobiomorphes and the ecological niches of each species. It was demonstrated that in continental water bodies, quantitative information on salt content and composition of water can only be obtained based on laboratory tests. Based on studies conducted in 1984–2023, quantitative ranges for water salt content for 247 species of hydromacrophytes in the West Siberian Plain were obtained. In the aquatic marcophyte flora of this region, 2 floristic systems were identified: a freshwater one and a saltwater one. The natural ecological threshold between these systems is the salt content range of 8–25 g/dm³, which is called critical salt content in hydrobiology. Species of a freshwater system limited within a salt content of up to 0.2 g/dm³ are called ultra-freshwater, up to 1 g/dm³ typical freshwater, up to 3 g/dm³ conditionally freshwater, up to 5 g/dm³ slightly saltish freshwater, up to 8 g/dm³ middle-saltish freshwater, up to 25 g/dm³ strongly saltish freshwater. Species living in a salt content range between 8 to 80 g/dm³ form

соляноводный комплекс. Указанные градации использованы при выделении экобиоморф гидромакрофитов наряду с другими экологическими параметрами (концентрация главных ионов и растворимых форм некоторых металлов, общая жесткость, pH воды). Эти границы разделяют экологические ниши видов и позволяют прогнозировать вероятный состав гидрофитоценозов на основе сведений о минерализации и составе воды в конкретных водных объектах.

Ключевые слова: поверхностные воды; главные ионы; макроскопические гидрофиты; галотолерантность; экологические ниши.

Сведения об авторе: Свириденко Борис Федорович, доктор биологических наук, Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия; bosviri@mail.ru

a saltwater system. These grades are used to identify ecobiomorphes of hydromacrophytes in combination with other ecological parameters (concentration of main ions and soluble forms of certain metals, total hardness and pH of water). These borders divide the ecological niches of the species making it possible to predict potential composition of hydrophyte conenoses based on the information on water salt content and composition in specific water bodies.

Keywords: surface waters; main ions; macroscopic hydrophytes; halotolerance; ecological niches.

About the author: Boris F. Sviridenko, Doctor of Biological Sciences, Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia, bosviri@mail.ru

Свириденко Б.Ф. Общая минерализация и химический состав воды как важные факторы для изучения экобиоморф и экологических ниш гидромакрофитов // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 29-42. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/03>

Sviridenko, B.F. (2025). Total Salt Content and Chemical Composition of Water as Important Factors for the Study of Ecobiomorphes and Ecological Niches of Hydromacrophytes. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 29-42. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/03>

Введение

Западно-Сибирская равнина является регионом, в котором факторы водной среды широко варьируют, что позволяет получить на этой территории количественную информацию об экологической толерантности гидромакрофитов. Минерализация (соленость) воды является одним из главных абиотических факторов для гидрофильных растений [4; 9; 13; 14; 15; 16; 23; 42]. Цель работы заключается в обосновании подходов к дифференциации экобиоморф гидромакрофитов на основе количественных данных о галотолерантности.

Для обитания разных видов гидромакрофитов пригодна как ультрапресная вода с очень низкой концентрацией растворенных минеральных веществ (до 0,1 г/дм³), так и в разной степени насыщенная солями. Каждый вид находит условия для своего существования только в определенной, нередко относительно узкой части общего диапазона минерализации поверхностных вод. Способность организмов (видов) жить в конкретном диапазоне минерализации вод получила название солевыносливости или галотолерантности. Это определение основано на законе толерантности В.Э. Шелфорда [18; 22; 24]. Известно, что растворенные в воде соли влияют не только на осмотические процессы в растительных клетках, но могут оказывать также токсическое действие, в связи с чем они представляют собой лимитирующий фактор. Поэтому выявление диапазонов галотолерантности, ограничивающих возможность существования континентальноводных видов, имеет большое научное значение в плане изучения экобиоморф и экологических ниш этих растений.

Под минерализацией воды понимают количество растворенных в ней минеральных веществ. В водных объектах вода не встречается в химически чистом виде, так как в ней растворены соли и другие вещества. Общая минерализация представляет сумму компонентов, найденных в ходе гидрохимического анализа. В число учитываемых компонентов обычно относят катионы калия (K^+), натрия (Na^+), кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}) и анионы хлора (Cl^-), сульфат-анион (SO_4^{2-}), гидрокарбонат-анион (HCO_3^-), тогда как другие ионы в этот показатель не входят [2; 21; 43]. При определении концентрации Ca^{2+} используют титриметрический метод с комплексоном III в присутствии индикатора мурексид, концентрации Cl^- – аргентометрический метод, SO_4^{2-} – весовой метод, HCO_3^- – метод обратного титрования в присутствии смешанного индикатора (метиловый красный – метиленовый голубой). Содержание катионов магния (Mg^{2+}) и одновалентных катионов ($K^+ + Na^+$) определяют путем расчета [3; 25; 36].

В современный период исследование ионного состава растворенных солей в воде проводят методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на ионном хроматографе «Стайер» с кондуктометрическим детектором. Для разделения ионов используют хроматографические колонки: при определении катионов – Shodex IC YS-50, при определении анионов – TRANSGENOMIC ICSep AN2 [20]. Для определения массовой концентрации карбонат- и гидрокарбонат-ионов используют значения свободной щелочности и общей щелочности, применяя соотношения и расчетные формулы [6; 7]. Содержание хлорид-иона определяют титриметрически по реакции с азотнокислым серебром [8]. Определение содержания нитрат-, фосфат-, сульфат-ионов проводят по методике [26]. В итоге общую минерализацию воды определяют как сумму ионов. Также выявляется общая жесткость воды, количественно выражаемая как сумма двухвалентных катионов ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$, мг-экв/дм³), и состав основных растворенных солей.

Существенно сложнее определение абсолютной величины минерализации воды по ее электропроводимости в пересчете на $NaCl$, так как природные воды представляют собой сложную смесь электролитов. Хлоридные ионы, по данным М.Г. Валяшко [5], начинают преобладать только при минерализации более 10%, однако в содовых и сульфатных гипергалинных озерах эти ионы также составляют лишь небольшую долю от общего состава. В то же время электропроводимость зависит в сильной мере от ионного состава, поэтому установление непосредственной связи между удельной электропроводимостью и концентрацией ионов в воде может быть сделано лишь со значительными погрешностями, а конечный результат чаще всего имеет неудовлетворительную точность [10]. Кроме того, метод не дает информации о составе растворенных солей и общей жесткости воды. Этот вывод наглядно демонстрируют материалы публикации [17], в которой для 27 водоемов приведены количественные данные о минерализации воды, полученные кондуктометрическим методом по электропроводимости (в пересчете на $NaCl$) и методами гидрохимического анализа. Большинство из этих водоемов (67%) имеют воду, не относящуюся по составу к хлоридно-натриевой согласно приведенным формулам М.Г. Курлова [17]. Полученные по электропроводимости значения минерализации воды составляют только 48–86% от реальных значений, полученных при гидрохимическом анализе. Таким образом, кондуктометрические измерения минерализации воды

континентальных водных объектов существенно искажают данный показатель и не могут использоваться в гидроботанических исследованиях.

Во многих работах для оценки экологии морских видов растений принято приводить данные о солености воды в так называемых практических единицах солености (psu) или даже просто в единицах измерения электропроводности воды (мкСм/см) без комментария об экологическом значении указанных величин. Но в разных частях акваторий внутренних морей состав основных ионов может сильно отличаться от океанического состава, при этом реальные значения солености сильно варьируют. Например, соленость вод Балтийского моря изменяется на разных участках от 2‰ до 20‰. Поэтому использование кондуктометрического метода оценки минерализации воды в подобных экосистемах также ведет к значительным ошибкам и неверным выводам относительно солевыносливости видов.

Материал и методы

В период 1984–2023 гг. на Западно-Сибирской равнине выполнялись работы по оценке параметров воды в экотопах водных макроскопических растений. Целью было выявление количественных диапазонов толерантности видов к ведущим параметрам водной среды. В 1984–1994 гг. сбор данных выполнялся в казахстанской части равнины. В экотопах изучалась концентрация основных ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), общая минерализация, общая жесткость, активная реакция воды. Эти параметры водной среды выражают количественно на основе измерений, выполняемых с применением аналитических методик, что позволяет объективно сравнивать экологические требования видов растений и использовать их в экобиоморфологической классификации и определении границ экологических ниш. В начале работы исследования параметров воды выполнялись Т.В. Свириденко в Северо-Казахстанской комплексной гидробиологической лаборатории Казахского НИИ рыбного хозяйства. Минерализация воды определялась как сумма основных ионов, количественно определяемых в трехкратной повторности с точностью до 5% на основе общепринятых методик [2; 3; 21; 25; 36; 43].

В 1995–2023 гг. эти исследования были продолжены на российской территории в основном в пределах Омской, Курганской, Тюменской, Новосибирской областей и Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Анализ проб воды выполнен Ю.А. Мурашко в гидрохимической лаборатории НИИ экологии Севера и Центре коллективного пользования Сургутского государственного университета на основе современного аналитического оборудования по соответствующим методикам [6; 7; 8; 29; 26].

В итоге результаты были представлены в табличной форме, где для видов гидромакрофитов указаны выявленные диапазоны значений общей минерализации, общей жесткости и pH воды (минимальные и максимальные). Полученные данные позволяют оценивать режимы изменений этих факторов, в пределах которых возможно существование каждого вида. Предварительные материалы были опубликованы ранее [29; 31; 32; 33], однако эти исследования продолжаются, в связи с чем диапазоны значений факторов систематически уточняются. Количественная оценка толерантности видов уже послужила основой для разработки системы экобиоморф цветковых гидрофитов и харовых водорослей (Charophyta) [27; 29; 34]. Кроме того, алгоритм количественной оценки параметров водной

среды на основе информации о толерантности видов макроскопических водорослей и высших гидрофитов к минерализации, жесткости и активной реакции приведен в одной из работ [30].

Всего была получена информация разной степени полноты о диапазонах галотолерантности 247 видов гидромакрофитов Западно-Сибирской равнины. Для широко распространенных видов диапазоны галотолерантности выявлены весьма надежно, в связи с чем полученные в последние годы новые данные не приводят к изменению их граничных значений. Однако для редких видов, находки которых на территории Западно-Сибирской равнины весьма малочисленны или даже единичны, приведенные диапазоны (единичные значения) носят предварительный характер. При анализе этих данных отмечено, что отдельные пороговые значения минерализации являются лимитирующими для целых групп видов, в связи с чем для выражения их галотолерантности была принята следующая градация поверхностных вод (табл. 1).

Таблица 1
Подразделение поверхностных вод Западно-Сибирской равнины по минерализации

Группы вод	Подгруппы вод	Минерализация, г/дм ³
Пресная	ультрапресная	до 0,2
	тиปично пресная	0,2–1,0
Условно-пресная	условно-пресная	1,1–3
Солоноватая	слабосолоноватая	3,1–5
	среднесолоноватая	5,1–8
	сильносолоноватая	8,1–25
Соляная	соляная	более 25

Соответственно, виды, отмеченные в диапазоне минерализации до 0,2 г/дм³, называем ультрапресноводными, до 1 г/дм³ – типично пресноводными, до 3 г/дм³ – условно-пресноводными, до 5 г/дм³ – слабосолоновато-пресноводными, до 8 г/дм³ – среднесолоновато-пресноводными, до 25 г/дм³ – сильносолоновато-пресноводными, выше 25 г/дм³ – соляноводными. Эти градации использованы при выделении экобиоморф гидромакрофитов наряду с другими экологическими параметрами (общая жесткость и pH воды).

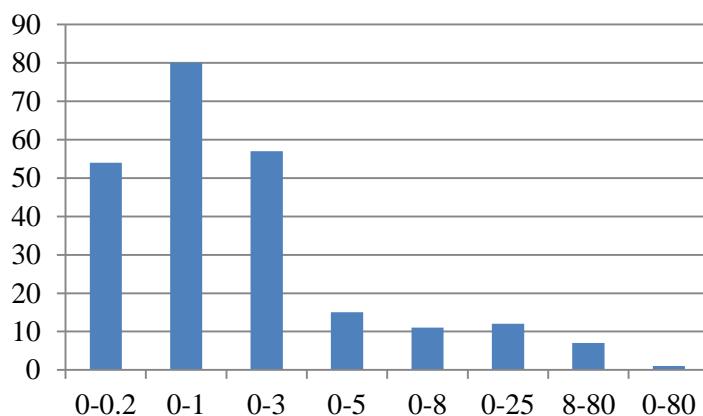
Результаты и обсуждение

В составе водной макрофитной флоры Западно-Сибирской равнины выделено 2 совокупности видов, которые обозначены как пресноводный и соляноводный флористические комплексы [28; 29]. Естественной экологической границей между данными комплексами является узкий диапазон минерализации, получивший в гидробиологической литературе название критической солености [41]. Согласно концепции критической солености, в воде океанического состава соленость около 5–8 г/дм³ представляет собой универсальный барьер, разделяющий биологические процессы разной направленности или интенсивности. Особая роль барьера критической солености объясняется резкими изменениями в этом диапазоне физико-химических свойств среды. Критическая соленость является границей распространения организмов с различной осморегуляторной способностью. По обе стороны узкой зоны солености 5–8 г/дм³ по-разному протекают обменные процессы в организмах и тканях, а многие важнейшие

макромолекулярные вещества имеют различную структуру [37; 41]. Барьерная роль солености 5–8 г/дм³ отчетливо проявляется только в водах с океаническим составом солей. В водах другого состава, например, в Аральском и Каспийском морях отмечено смещение критической солености в сторону более высоких концентраций и одновременное увеличение интервала между его крайними точками [1; 12]. Это явление имеет место и в поверхностных водах Западно-Сибирской равнины, отличающихся широким разнообразием по концентрации и составу солей. Поэтому обобщенная «зона стыка» видов пресноводного и соляноводного флористических комплексов в местных водоемах охватывает диапазон минерализации 8–25 г/дм³, то есть расположена в сильносолоноватых водах. Критическая соленость в пределах этой зоны сдвигается в ту или другую сторону в зависимости от состава воды в конкретном водоеме. Это явление связано с действием закона антагонизма ионов Ж. Леба, согласно которому токсическое влияние одновалентных катионов ($K^+ + Na^+$) существенно нивелируется при наличии в воде двухвалентных катионов ($Mg^{2+} + Ca^{2+}$) [11; 44]. Как известно, в аридных и semiаридных районах Северной Евразии широко распространены среди минерализованных поверхностных вод не только хлоридно-натриевые, но также сульфатные и гидрокарбонатные воды с высоким содержанием двухвалентных катионов кальция и магния [38; 39; 40]. При минерализации меньше 8–25 г/дм³ отмечается максимум видов пресноводного комплекса, соответственно, при минерализации более 8–25 г/дм³ располагается максимум видов соляноводного комплекса. Виды из разных флористических комплексов редко формируют общие фитоценозы, поскольку критическая соленость (диапазон 8–25 г/дм³) является для них одинаково неблагоприятной. В водных объектах с такой минерализацией наблюдается низкопродуктивные популяции минимального числа видов.

Установлено, что на Западно-Сибирской равнине пресноводный флористический комплекс экологически неоднороден. Он подразделяется на группы: ультрапресноводную (23% видов), типично пресноводную (34%), условно-пресноводную (24%), слабосолоновато-пресноводную (6%), среднесолоновато-пресноводную (5%) и сильносолоновато-пресноводную (5%). Эти группы условны и между ними нет четких границ, поскольку существует экологический континuum. Соляноводный флористический комплекс (2,7%) представляют виды, не проникающие в пресные, условно-пресные и слабосолоноватые воды: *Lamprothamnium papulosum* (Wallr.) J. Groves, *Percursaria percursa* (Ag.) Bory, *Ulothrix flacca* (Dillwyn) Thuret, *Ulothrix implexa* (Kützing) Kützing, *Ruppia maritima* L., *Ruppia drepanensis* Tineo и *Althenia filiformis* F. Petit subsp. *orientalis* Tzvel. (рис. 1). Особо выделяется эвригалинний вид *Cladophora glomerata* (L.) Kützing, отмеченный в очень широком диапазоне минерализации воды (0,10–79,70 г/дм³).

Согласно определению И.Г. Серебрякова [35], понятие «жизненная форма» содержит 3 аспекта: 1 – жизненная форма как основная таксономическая единица; 2 – жизненная форма как своеобразный общий облик (габитус) дефинитивных особей вида, включая надземные и подземные органы; 3 – жизненная форма как выражение приспособленности растений к определенным условиям абиотической и биотической среды.



**Рис. 1. Количество видов гидромакрофитов из разных галотолерантных групп.
По оси абсцисс – диапазоны галотолерантности (г/дм³), по оси ординат – количество видов**

Жизненные формы (биоморфы) растений характеризуют на основе важнейших биологических и морфологических параметров видов, позволяющих кратко, но достаточно информативно описать их габитус. К таким признакам у цветковых гидромакрофитов принадлежат продолжительность большого жизненного цикла (многолетние, двулетние, однолетние), степень связи видов с грунтом как со средой обитания (укореняющиеся, свободноплавающие), типы и расположение зимующих почек в сочетании с особенностями структуры надземных побегов (длиннопобеговые корневищные, розеточные корневищные, длиннопобеговые клубневые, розеточные клубневые, длиннопобеговые столонные, длиннопобеговые турionовые укореняющиеся, розеточные турionовые, длиннопобеговые турionовые свободноплавающие, листьевые турionовые, длиннопобеговые без зимующих почек – гидротерофиты).

Также учитывается положение ассимиляционной поверхности относительно границы, разделяющей водную и воздушную среды (гелофиты, плейстофиты, гидатофиты), линейные размеры дефинитивных особей (высокие, средневысокие, низкие) и некоторые специфические черты биологии и морфологии, например, листорасположение (для длиннопобеговых), форма листовых пластинок и их развитость, наличие листовых ловчих камер, форма листьев, особенности цветения (надводно- и подводноцветущие) [27].

В определении понятия «жизненная форма» И.Г. Серебрякова [35] третий аспект акцентирует внимание на выявлении факторов, обеспечивших эволюционное формирование биоморфы конкретного вида, что в итоге позволяет установить специфику его экологической ниши. Это направление было дополнено в работах Е.М. Лавренко и В.М. Свешниковой [19], сформулировавших представление об экобиоморфах. Именно эта задача количественной оценки экологической индивидуальности каждого вида и его экологической ниши является основной при экобиоморфологических исследованиях. Экобиоморфологическая концепция имеет особенно решающее значение при изучении жизненных форм не только высших гидромакрофитов, но и многих континентальноводных макроскопических низших растений, у которых габитуальные признаки малоинформативны, в связи с чем системы жизненных форм еще не разработаны. Биоморфы близкородственных видов из некоторых родов высших гидромакрофитов также

сложно дифференцировать на основании только биолого-морфологических признаков, поэтому количественные данные о галотолерантности имеют решающие значение для выявления их экобиоморф и экологических ниш.

Например, биоморфы видов из рода *Myriophyllum* – *M. spicatum* L. и *M. verticillatum* L. весьма сходны габитуально (рис. 2, а), однако на основе выявленных значений галотолерантности их экобиоморфы различаются.

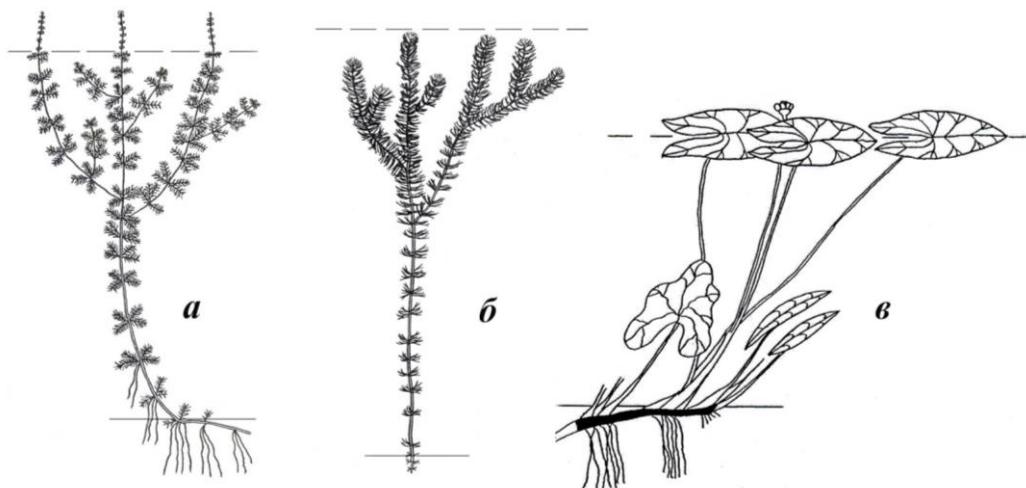


Рис. 2. Схемы биоморф видов: а – *Myriophyllum spicatum* и *M. verticillatum*; б – *Ceratophyllum demersum* и *C. submersum*; в – *Nuphar lutea* и *N. pumila*. Пунктиром показан уровень воды, сплошной линией – уровень грунта

В экобиоморфологической классификации вид *M. spicatum* – многолетний поликарпический длиннопобеговый турионовый укореняющийся высокий надводноцветущий слабосолоновато-пресноводный (диапазон минерализации 0,20–4,10 г/дм³) гидатофит, вид *M. verticillatum* – многолетний поликарпический длиннопобеговый турионовый укореняющийся высокий надводноцветущий условно-пресноводный (диапазон минерализации 0,02–2,70 г/дм³) гидатофит.

Другой пример относится к двум сходным по биоморфам видам из рода *Ceratophyllum*: *C. demersum* L. и *C. submersum* L. (рис. 2, б), экобиоморфы которых различаются по галотолерантности. Вид *Ceratophyllum demersum* – многолетний длиннопобеговый турионовый свободноплавающий (бескорневой) высокий подводноцветущий условно-пресноводный (диапазон галотолерантности 0,03–1,60 г/дм³) гидатофит, тогда как *C. submersum* – многолетний длиннопобеговый турионовый свободноплавающий (бескорневой) высокий подводноцветущий слабосолоновато-пресноводный (диапазон галотолерантности 0,23–5,10 г/дм³) гидатофит.

Существенно различаются по экобиоморфам сходные виды *Nuphar lutea* (L.) Smith и *N. pumila* (Timm) DC. (рис. 2, в). Вид *Nuphar lutea* многолетний поликарпический корневищный розеточный высокий надводноцветущий условно-пресноводный (диапазон минерализации 0,03–1,69 г/дм³) плейстофит, тогда как *N. pumila* – многолетний поликарпический корневищный розеточный высокий надводноцветущий типично пресноводный (диапазон минерализации 0,01–0,90 г/дм³) плейстофит.

На этих примерах показано, что морфологически сходные виды занимают различные экологические ниши. В итоге выявленные количественные диапазоны минерализации для видов гидромакрофитов наряду с другими экологическими параметрами (состав ионов, общая жесткость, концентрация растворимых форм некоторых металлов, pH воды) обеспечивают объективное описание их экобиоморф. Установленные границы в континууме значений минерализации поверхностных вод Западно-Сибирской равнины разделяют экологические ниши видов растений и позволяют прогнозировать вероятный состав гидрофитоценозов на основе сведений о минерализации и составе воды в конкретных водных объектах. При исследовании экологических ниш видов представляют интерес не только верхние значения диапазонов, но также и нижние. Ультрапресноводные виды, отмеченные в очень узком диапазоне минерализации ($0\text{--}0,2 \text{ г/дм}^3$), в условиях Западно-Сибирской равнины чаще всего связаны с дистрофическими водными объектами (внутриболотными озерами). В таких водах, относимых О.А. Алекиным [2] к четвертому типу, для которого характерно крайне низкое содержание гидрокарбонатного аниона ($\text{HCO}_3^- = 0$) активная реакция кислая. Кроме того, в этих водах отмечено общее низкое содержание других растворенных солей, в том числе источников биогенных элементов. Эти гидроэкотопы заселяют ацидотolerантные олиготрофные виды, так как они не пригодны для представителей типично пресноводных, условно-пресноводных и солоновато-пресноводных групп.

Выводы

Количественные значения общей минерализации, установленные в ходе лабораторного анализа проб воды из экотопов видов, позволяют определить диапазон их солевыносливости. Наряду с другими факторами среды, значения которых оцениваются количественно (концентрация главных ионов и растворимых форм некоторых металлов, общая жесткость, активная реакция), установленные диапазоны галотолерантности видов служат научной основой для дифференциации их экобиоморф. Максимальные значения общей минерализации, выявленные для разных видов, представляют собой существенные границы, позволяющие определять их экологические ниши в отношении данного абиотического фактора.

Диапазон минерализации поверхностных вод Западно-Сибирской равнины, в пределах которого могут существовать гидромакрофиты, составляет от 0 до 80 г/дм^3 . Установлено, что этот экологический континуум занят двумя комплексами видов – пресноводным и соляноводным, которые разделены диапазоном минерализации $8\text{--}25 \text{ г/дм}^3$. В пресноводном комплексе выделены группы ультрапресноводных, типично пресноводных, условно-пресноводных, слабосолоновато-пресноводных, среднесолоновато-пресноводных и сильносолоновато-пресноводных видов, для которых обозначены максимальные количественные границы галотолерантности. В соляноводном комплексе выделена группа видов, обитающих в диапазоне минерализации от сильносолоноватых до соляных вод. Особо выделяется эвригалинний вид *Cladophora glomerata*, отмеченный в очень широком диапазоне минерализации воды.

В пределах установленных групп диапазоны солевыносливости каждого вида также весьма индивидуальны, что позволяет на их основе дифференцировать экобиоморфы даже

морфологических очень близких видов. При исследовании экологических ниш видов представляют интерес не только максимальные значения диапазонов галотолерантности, но также и минимальные. Виды соляноводного комплекса не проникают в пресные воды. Также отмечено, что ультрапресные кислые воды с низким содержанием гидрокарбонатного иона не пригодны для представителей типично пресноводных, условно-пресноводных и солоновато-пресноводных групп видов.

Литература

1. Аладин Н.В. О смещении барьера критической солености в Каспийском и Аральском морях на примере жаброногих и ракушковых ракообразных // Зоологический журнал. 1983. Т. 62, вып. 5. С. 689-694.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
3. Алекин А.О., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 268 с.
4. Богдановская-Гиенэф И.Д. Водная растительность СССР // Ботанический журнал. 1974. Т. 59. № 12. С. 1728-1733.
5. Валяшко М.Г. Закономерности формирования месторождений солей. М.: Изд-во МГУ, 1962. 400 с.
6. 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.
7. ГОСТ Р 52963-2008 (ИСО 9963-1:1994, ИСО 9963-2:1994). Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов // Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2009. С. 362-392.
8. ГОСТ 4245-72. Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов // Межгосударственный стандарт. М.: Национальные стандарты, 2007. С. 487-492.
9. Доброхотова К.В., Ролдугин И.И., Доброхотова О.В. Водные растения. Алма-Ата: Кайнар, 1982. 191 с.
10. Зори А.А., Коренев В.Д., Марковский Ю.Е. Экспресс-метод определения общей минерализации питьевой воды // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація. Вип. 107. Донецьк, 2006. С. 135-142.
11. Иоганzen Б.Г. Экология // Экология, биогеоценология и охрана природы. Томск: Изд-во ТГУ, 1979. С. 5-95.
12. Карпович А.Ф. Теория и практика акклиматизации водных организмов. М.: Пищевая промышленность, 1975. 432 с.
13. Катанская В.М. Водная растительность озер равнинного Казахстана в связи с внутривековой изменчивостью их состояния // Озера Казахстана и Киргизии и их история. Л.: Наука, 1975. С. 216-228.
14. Катанская В.М. Растительность водохранилищ-охладителей тепловых электростанций Советского Союза. Л.: Наука, 1979. 279 с.
15. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Л.: Наука, 1981. 187 с.
16. 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.

17. Киприянова Л.М., Долматова Л.А., Базарова Б.Б., Найданов Б.Б., Романов Р.Е., Цыбекмитова Г.Ц., Дьяченко А.В. К экологии представителей рода *Stuckenia* (Potamogetonaceae) в озерах Забайкальского края и Республики Бурятия // Биология внутренних вод. 2017. № 1. С. 74-83.
18. Культиасов И.М. Экология растений. М.: Изд-во МГУ, 1982. 384 с.
19. 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.
20. Методика выполнения измерений массовой концентрации катионов аммония, калия, натрия, магния, кальция и стронция в пробах питьевой, минеральной, столовой, лечебно-столовой, природной и сточной воды методом ионной хроматографии. ФР.1.31.2005.01738 // Сборник методик выполнения измерений. М.: ЗАО Аквилон, 2012. 539 с.
21. Никаноров А.М. Гидрохимия: учебник. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.
22. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
23. Поляков П.П. К биологии водных растений степного Казахстана // Ботанический журнал. 1952. Т. 2. №. 5. С. 678-682.
24. Реймерс Н.Ф., Яблоков А.В. Словарь терминов и понятий, связанных с охраной живой природы. М.: Наука, 1982. 144 с.
25. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. доктора химических наук профессора А.Д. Семенова. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 542 с.
26. Сборник методик выполнения измерений. М.: Аквилон, 2012. 539 с.
27. Свириденко Б.Ф. Жизненные формы цветковых гидрофитов Северного Казахстана // Ботанический журнал, 1991. Т.76. № 5. С. 687-698.
28. Свириденко Б.Ф., Свириденко Т.В. Солевыносливость водных макрофитов Северного Казахстана. Алма-Ата, 1986. Деп. в КазНИИНТИ 17.02.86. № 1186а. 25 с.
29. Свириденко Б.Ф. Флора и растительность водоемов Северного Казахстана. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2000. 196 с.
30. Свириденко Б.Ф., Мамонтов Ю.С., Свириденко Т.В. Использование гидромакрофитов в комплексной оценке экологического состояния водных объектов Западно-Сибирской равнины. Омск: Амфора, 2011. 231 с.
31. Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А., Свириденко Т.В., Ефремов А.Н. Тolerантность гидромакрофитов к активной реакции, минерализации и жесткости воды в природных и техногенных водных объектах Западно-Сибирской равнины // Вестник НВГУ. Экология. 2016. № 2. С. 8-17.
32. Свириденко Б.Ф., Мурашко Ю.А., Свириденко Т.В., Ефремов А.Н. Содержание нефтяных углеводородов в экотопах гидромакрофитов Западно-Сибирской равнины (Тюменская и Омская области) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 1. С. 25-30.
33. 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. Биологические науки. 2017. № 4. С. 81-96.
34. Свириденко Т.В., Свириденко Б.Ф. Харовые водоросли (Charophyta) Западно-Сибирской равнины. Омск: Амфора, 2016. 247 с.
35. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. М.: Высшая школа, 1962. 379 с.
36. Унифицированные методы анализа вод СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 145 с.
37. Федоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология. М.: Изд-во МГУ, 1980. 464 с.
38. Форш Т.Б. Гидрохимическая характеристика озер Северного Казахстана в связи с условиями их существования // Озера полусаванной зоны. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 75-117.

39. Форш Т.Б. Внутривековые изменения общей минерализации и ионного состава вод озер с semiаридной зоны // Озера semiаридной зоны СССР. Л.: Наука, 1969. С. 20-35.
40. Форш Т.Б. Гидрохимическая характеристика озер semiаридных областей СССР // Озера semiаридной зоны СССР. Л.: Наука, 1969. С. 36-48.
41. Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 236 с.
42. Шенников А.П. Экология растений. М.: Советская наука, 1950. 375 с.
43. Шишкина Л.А. Гидрохимия. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 288 с.
44. Якушкина Н.И., Бахтенко Е.Ю. Физиология растений: учебник для вузов. М.: Гуманитарный издательский центр ВЛАДОС, 2005. 463 с.

References

1. Aladin, N.V. (1983). O smeshchenii baryera kriticheskoy solenosti v Kaspiyskom i Aralskom moryakh na primere zhabronogikh i rakushkovykh rakoobraznykh. *Zoologicheskiy zhurnal*. 62 (5), 689-694. (in Russ.)
2. Alekin, O.A. (1970). Osnovy gidrokhimii. L.: Gidrometeoizdat. 1-444. (in Russ.)
3. Alekin, A.O., Semenov, A.D., Skopintsev, B.A. (1973). Rukovodstvo po khimicheskому analizu vod sushi. L.: Gidrometeoizdat. 1-268. (in Russ.)
4. Bogdanovskaya-Giyenef, I.D. (1974). Vodnaya rastitelnost SSSR. *Botanicheskiy zhurnal*. 59 (12), 1728-1733. (in Russ.)
5. Valyashko, M.G. (1962). Zакономерности формирования месторождений солей. М.: Izd-vo MGU. 1-400. (in Russ.)
6. Voda. Metody opredeleniya shchelochnosti i massovoy kontsentratsii karbonatov i hidrokarbonatov. (2009). *GOST R 52963-2008. Federalnoye agentstvo po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii*. M.: Standartinform. 362-392. (in Russ.)
7. GOST R 52963-2008 (ISO 9963-1:1994. ISO 9963-2:1994). (2009). *Voda. Metody opredeleniya shchelochnosti i massovoy kontsentratsii karbonatov i hidrokarbonatov // Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii*. M.: Standartinform. 362-392. (in Russ.)
8. GOST 4245-72. (2007). *Voda pityevaya. Metody opredeleniya soderzhaniya khloridov // Mezhgosudarstvennyy standart*. M.: Natsionalnyye standarty. 487-492. (in Russ.)
9. Dobrokhotova, K.V., Roldugin, I.I., & Dobrokhotova, O.V. (1982). Vodnyye rasteniya. Alma-Ata: Kaynar. 1-191. (in Russ.)
10. Zori, A.A., Korenev, V.D., & Markovskiy, Yu.E. (2006). Ekspress-metod opredeleniya obshchey mineralizatsii pityevoy vody. *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: obchisllyuvalna tekhnika ta avtomatizatsiya*. (107). Donetsk. 135-142. (in Russ.)
11. Ioganzen, B.G. (1979). Ekologiya. *Ekologiya. biogeotsenologiya i okhrana prirody*. Tomsk: Izd-vo TGU. 5-95. (in Russ.)
12. Karpevich, A.F. (1975). Teoriya i praktika akklimatizatsii vodnykh organizmov. M.: Pishchevaya promyshlennost. 1-432. (in Russ.)
13. Katanskaya, V.M. (1975). Vodnaya rastitelnost ozer ravninnogo Kazakhstana v svyazi s vnutrivekovoy izmenchivostyu ikh sostoyaniya. *Ozera Kazakhstana i Kirgizii i ikh istoriya*. L.: Nauka. 216-228. (in Russ.)
14. Katanskaya, V.M. (1979). Rastitelnost vodokhranilishch-okladiteley teplovykh elektrostantsiy Sovetskogo Soyuza. L.: Nauka. 1-279. (in Russ.)
15. Katanskaya, V.M. (1981). Vysshaya vodnaya rastitelnost kontinentalnykh vodoyemov SSSR. L.: Nauka. 1-187. (in Russ.)

16. Katanskaya, V.M., & Raspopov, I.M. (1983). Metody izucheniya vysshey vodnoy rastitelnosti. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza vod i donnykh otlozheniy*. L.: Nauka. 129-218. (in Russ.)
17. Kipriyanova, L.M., Dolmatova, L.A., Bazarova, B.B., Naydanov, B.B., Romanov, R.E., Tsybekmitova, G.T., & Diachenko, A.V. (2017). K ekologii predstaviteley roda *Stuckenia* (Potamogetonaceae) v ozerakh Zabaykalskogo kraya i Respubliki Buryatiya. *Biologiya vnutrennikh vod*. (1), 74-83. (in Russ.)
18. Kultiasov, I.M. (1982). Ekologiya rasteniy. M.: Izd-vo MGU. 1-384. (in Russ.)
19. Lavrenko, E.M., & Sveshnikova, V.M. (1965). O sinteticheskem izuchenii zhiznennykh form na primere stepnykh dernovinnykh zlakov. Predvaritelnaya soobshcheniya // *Zhurnal obshchey biologii*. 26 (3), 261-275. (in Russ.)
20. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii kationov ammoniya. kaliya. natriya. magniya. kaltsiya i strontsiya v probakh pityevoy. mineralnoy. stolovoy. lechebno-stolovoy. prirodnoy i stochnoy vody metodom ionnoy khromatografii. FR.1.31.2005.01738 (2012). *Sbornik metodik vypolneniya izmereniy*. M.: ZAO Akvilon. 1-539. (in Russ.)
21. Nikonorov, A.M. (2001). Gidrokhimiya: uchebnik. SPb.: Gidrometeoizdat. 1-444. (in Russ.)
22. Odum, Yu. (1975). Osnovy ekologii. M.: Mir. 1-740. (in Russ.)
23. Polyakov, P.P. (1952). K biologii vodnykh rasteniy stepnogo Kazakhstana // *Botanicheskiy zhurnal*. 2 (5), 678-682. (in Russ.)
24. Reymers, N.F., & Yablokov, A.V. (1982). Slovar terminov i ponyatiy. svyazannykh s okhranoy zhivoy prirody. M.: Nauka. 1-144. (in Russ.)
25. Rukovodstvo po khimicheskemu analizu poverkhnostnykh vod sushi. (1970). L.: Gidrometeoizdat. 1-542. (in Russ.)
26. Sbornik metodik vypolneniya izmereniy. (2012). M.: Akvilon. 1-539. (in Russ.)
27. Sviridenko, B.F. (1991). Zhiznennyye formy tsvetkovykh gidrofitov Severnogo Kazakhstana. *Botanicheskiy zhurnal*. 76 (5), 687-698. (in Russ.)
28. Sviridenko, B.F., & Sviridenko, T.V. (1986). Colevynoslivost vodnykh makrofitov Severnogo Kazakhstana. Alma-Ata. *Dep. v KazNIINTI 17.02.86. 1186a*. 1-25. (in Russ.)
29. Sviridenko, B.F. (2000). Flora i rastitelnost vodoyemov Severnogo Kazakhstana. Omsk: Izd-vo OmGPU. 1-196. (in Russ.)
30. Sviridenko, B.F., Mamontov, Yu.S., & Sviridenko, T.V. (2011). Ispolzovaniye gidromakrofitov v kompleksnoy otsenke ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh obyektov Zapadno-Sibirskoy ravniny. Omsk: Amfora. 1-231. (in Russ.)
31. Sviridenko, B.F., Murashko, Yu.A., Sviridenko, T.V., & Efremov, A.N. (2016). Tolerantnost gidromakrofitov k aktivnoy reaktsii. mineralizatsii i zhestkosti vody v prirodnykh i tekhnogennykh vodnykh obyekta Zapadno-Sibirskoy ravniny. *Vestnik NVGU. Ekologiya*. (2), 8-17. (in Russ.)
32. Sviridenko, B.F., Murashko, Yu.A., Sviridenko, T.V., & Efremov, A.N. (2017). Soderzhaniye neftyanykh uglevodorodov v ekotopakh gidromakrofitov Zapadno-Sibirskoy ravniny (Tyumenskaya i Omskaya oblasti). *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. (1), 25-30. (in Russ.)
33. Sviridenko, B.F., Murashko, Yu.A., Sviridenko, T.V., Efremov A.N., & Tokar, O.E. (2017). Soderzhaniye tyazhelykh metallov v ekotopakh gidromakrofitov Zapadno-Sibirskoy ravniny. *Vestnik SurgGU. Biologicheskiye nauki*. (4), 81-96. (in Russ.)
34. Sviridenko, T.V., & Sviridenko, B.F. (2016). Kharovyye vodorosli (Charophyta) Zapadno-Sibirskoy ravniny. Omsk: Amfora. 1-247. (in Russ.)
35. Serebryakov, I.G. (1962). Ekologicheskaya morfologiya rasteniy. M.: Vysshaya shkola. 1-379. (in Russ.)

36. Unifitsirovannyye metody analiza vod SSSR. (1978). L.: Gidrometeoizdat. 1-145. (in Russ.)
37. Fedorov, V.D., & Gilmanov, T.G. (1980). Ekologiya. M.: Izd-vo MGU. 1-464. (in Russ.)
38. Forsh, T.B. (1963). Gidrokhimicheskaya kharakteristika ozer Severnogo Kazakhstana v svyazi s usloviyami ikh sushchestvovaniya. *Ozera poluariidnoy zony*. M.; L.: Izd-vo AN SSSR. 75-117. (in Russ.)
39. Forsh, T.B. (1969). Vnutriveaukovyye izmeneniya obshchey mineralizatsii i ionnogo sostava vod ozer semiaridnoy zony. *Ozera semiaridnoy zony SSSR*. L.: Nauka. 20-35. (in Russ.)
40. Forsh, T.B. (1969). Gidrokhimicheskaya kharakteristika ozer simiaridnykh oblastey SSSR. *Ozera semiaridnoy zony SSSR*. L.: Nauka. 36-48. (in Russ.)
41. Khlebovich, V.V. (1974). Kriticheskaya solenost biologicheskikh protsessov. L.: Nauka. 1-236. (in Russ.)
42. Shennikov, A.P. (1950). Ekologiya rasteniy. M.: Sovetskaya nauka. 1-375. (in Russ.)
43. Shishkina, L.A. (1974). Gidrokhimiya. L.: Gidrometeoizdat. 1-288. (in Russ.)
44. Yakushkina, N.I., & Bakhtenko, E.Yu. (2005). Fiziologiya rasteniy: uchebnik dlya vuzov. M.: Gumanitarnyy izdatelskiy tsentr VLADOS. 1-463. (in Russ.)

дата поступления: 17.10.2025

дата принятия: 08.12.2025

© Свириденко Б.Ф., 2025

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
(*PINUS SYLVESTRIS L.*) ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ВОЗОБНОВЛЕНИИ
НА ОТВАЛАХ КУМЕРТАУСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА
(РОССИЯ, РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

A.R. Tagirov

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS L.*)
DURING NATURAL REGENERATION IN THE DUMPS OF THE KUMERTAU LIGNITE
SECTION (RUSSIA, THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

Аннотация. На отвалах Кумертауского буру угольного разреза (КБР) отмечается успешное естественное возобновление сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*). Цель исследования - охарактеризовать особенности архитектуры надземной и подземной частей сосны при естественном возобновлении на отвалах КБР. Задачи исследования: представить характеристику морфологических особенностей надземной и подземной частей сосны обыкновенной при естественном возобновлении; охарактеризовать особенности формирования кроны и ассимиляционного аппарата растений сосны; описать особенности формирования корневой системы сосны при естественном возобновлении на отвалах КБР. Модельные растения выкапывались в октябре, упаковывались, транспортировались и хранились в сухом прохладном месте чтобы не допустить осыпания хвои. Далее проводилась камеральная обработка растений: корневая система отмывалась от субстрата, после чего измерялась общая длина растения, а также отдельно длина надземной и подземной частей с ориентацией по корневой шейке; определялась ширина надземной и подземной частей, измерялся диаметр корневой шейки. Приросты растений измерялись, начиная с прироста последнего года (2024 г.) и за предыдущие годы. Отдельно измерялись количество, длина и масса хвои, а также величина и масса годичных приростов. Возраст растений определялся по мутовкам (лупа с $\times 2$ и $\times 10$ -кратным увеличением). Также возраст растений определялся по количеству годичных колец на срезе (на уровне корневой шейки). Анализ архитектуры надземной и подземной частей подроста сосны обыкновенной при естественном возобновлении на промышленных отвалах свидетельствует о неравномерности развития растений. Установлено, что при успешном росте сосны в высоту и выходе за уровень травяного покрова происходит

Abstract. Successful natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) was noted at the dumps of the Kumertau brown coal mine (KBR). The purpose of the study was to characterize the architectural features of aboveground and underground parts of pine during natural regeneration at KBR dumps. Research objectives: to describe morphological features of above- and underground pine parts during natural regeneration, to characterize crown formation and assimilation apparatus features of pine plants, and to describe formation features of root system in natural regeneration process on KBR dump sites. Model plants were excavated in October, packaged, transported, and kept in a cool, dry location to prevent needle shedding. Next, the camera treatment of plants was carried out. The root system was washed and the plant was measured along the entire length of the plant, separately measuring the length of aboveground and underground parts guided by the root neck. The width of above- and underground parts was also measured, as well as the diameter of the root neck and increments from the last year's growth (2024). The number, length, and mass of needles were measured individually, as were the amount and weight of annual increments. The age of plants was determined using a magnifying glass with $\times 2$ and $\times 10$ magnifications. The whorls were also used to determine the age of the plants. Additionally, the number of rings at the level of the root necks was used to estimate the age. An analysis of the above- and below-ground architecture of Scots pine undergrowth undergoing natural regeneration in industrial waste areas revealed uneven development patterns among plants.. It has been established that, with the successful growth of a pine tree, height and beyond the

дальний активный рост и увеличение размеров кроны дерева, а также массы осевых и боковых приростов. Для сосен 8-летнего возраста такие показатели, как длина надземной части, ширина надземной части, длина подземной части, ширина подземной части, размеры и масса осевых и боковых приростов, а также количество и масса хвои отличаются. Выявлены индивидуальные различия в развитии сеянцев при естественном возобновлении на отвалах КБР, что определяется индивидуальной изменчивостью растений сосны.

Практическая значимость результатов исследования заключается в установлении роли лесных культур, созданных при проведении работ по лесной рекультивации на отвалах КБР в процессе естественного возобновления сосны на нарушенных ландшафтах. Представляет теоретический и практический интерес характеристика процесса формирования ценопопуляций сосны на отвалах КБР при естественном возобновлении.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; естественное возобновление; рекультивация; отвалы.

Об авторе: Альберт Р. Тагиров, ORCID: 0009-0008-3837-8304, Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Россия, albertoc22@mail.ru

level of grass cover occurs further active growth and increase in the size of tree crown, as well as mass of axial and lateral growth. For 8-year-old pines, indicators such as length of aboveground part, width of aboveground and underground parts, size and weight of axial and laterals, as well number and weight needles differ. Individual differences in development of seedlings during natural regeneration at CBD dumps were identified, which is due to individual variability in pine plants.

The practical significance of the research results lies in establishing the role of forest crops created during forest reclamation work at CBD landfills in the natural regeneration process of pine trees in disturbed landscapes. It is theoretically and practically interesting to characterize the formation of pine cenopopulation in CBD landfill during natural regeneration.

Key words: Scots pine; natural regeneration; landfill reclamation; spoil heaps.

About the author: Albert R. Tagirov, ORCID: 0009-0008-3837-8304, Ufa Institute of Biology, a separate structural unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, albertoc22@mail.ru

Тагиров А.Р. Морфологическая характеристика сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при естественном возобновлении на отвалах кумертауского буроугольного разреза (Россия, республика Башкортостан) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 43-54. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/04>

Tagirov, A.R. (2025). Morphological Characteristics of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) During Natural Regeneration in the Dumps of the Kumertau Lignite Section (Russia, the Republic of Bashkortostan). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 43-54. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/04>

Введение

Вопросы изменчивости морфологических признаков хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в горных и равнинных лесорастительных условиях свидетельствуют об изменчивости природных популяций сосны обыкновенной [17; 12 11 3; 7].

Показана вариативность морфологических показателей сеянцев сосны по таким параметрам как высота, диаметр корневой шейки, количество верхушечных почек, количество боковых побегов, длина максимального бокового побега, длина хвои, наличие треххвойных брахибластов, абсолютно сухая масса хвои, абсолютно сухая масса стволиков [13; 15]. При оценке особенностей формирования пигментного комплекса хвои сосны на

техногенных землях охарактеризованы адаптивные изменения пигментного комплекса [14]. Выявлены нарушения роста и развития сосны при рекультивации дражных отвалов и отмечено пожелтение хвои у 12-летних древостоев [6]. Показано, что усыхание хвои является первым признаком отмирания древостоя сосны при дефиците водообеспечения [18].

В лесостепной зоне южного Предуралья в зоне расположения Кумертауского бороугольного разреза (КБР) отсутствуют естественные лесные массивы сосны обыкновенной. Отвалы Кумертауского бороугольного разреза расположены на границе зон лесостепи и разнотравно-дерновинно-злаковых степей в пределах административных границ Куюргазинского района Республики Башкортостан Российской Федерации. Отвалы представляют смесь вскрышных пород (алевритов, песчаников, угольных отложений), которые характеризуются гидрофобностью, в весенне-летний период сильно нагреваются и трескаются. Следует отметить, что в регионе естественных насаждений сосны не имеется. При этом совокупность природно-климатических факторов в целом определяет возможность произрастания сосны обыкновенной в регионе, в том числе и на отвалах КБР [2]. В 1982–1986 гг. на отвалах КБР были проведены опытно-производственные работы по созданию лесных культур. Насаждениям сосны более 40 лет и в течение последних 20 лет отмечается ежегодное успешное плодоношение деревьев, что подтверждается разновозрастностью сеянцев сосны [10]. Остается открытым вопрос об особенностях роста и развития сеянцев сосны на начальных этапах онтогенеза. В этом случае характеристика модельных растений позволяет установить закономерности формирования подроста сосны. Актуальность исследования заключается в определении перспектив естественного возобновления сосны при формировании лесного покрова на отвалах КБР.

Цель работы – охарактеризовать особенности архитектуры надземной и подземной частей сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при естественном возобновлении на отвалах КБР.

Для достижения цели были определены следующие задачи: 1 – представить характеристику морфологических особенностей надземной и подземной частей сосны обыкновенной при естественном возобновлении; 2 – охарактеризовать особенности формирования кроны и ассимиляционного аппарата растений сосны; 3 – описать особенности формирования корневой системы сосны обыкновенной при естественном возобновлении на отвалах КБР.

Материал и методы

Работы проводились на отвалах КБР, на территории участка лесной рекультивации (рис. 1).

Исследования по выбору, выкопке и характеристике модельных деревьев сосны проводились с учетом общепринятых методов [1; 9].

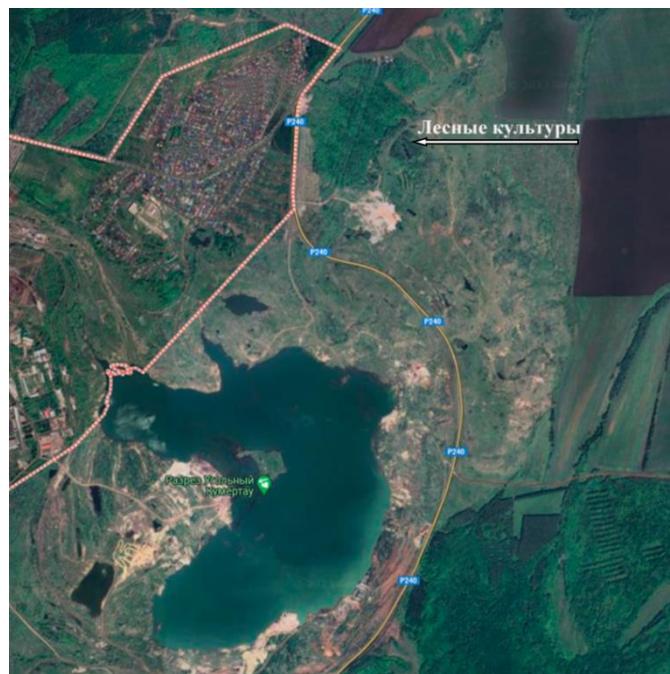


Рис. 1. Картосхема карьерно-отвального комплекса Кумертауского буроугольного разреза (Россия, Республика Башкортостан). Отмечено местоположение участка лесной рекультивации ([URL: https://clck.ru/3Qrc2G](https://clck.ru/3Qrc2G); находится в открытом доступе)

Модельные растения сосны выкапывались в конце октября 2024 года, в период выпадения осенних осадков, что позволило извлекать растения из грунта с минимальными повреждениями корневой системы. Выкопка производилась лопатами с учетом особенностей строения и роста корневой системы сосны. После выкопки модельные растения упаковывались и транспортировались для хранения в холодное помещение, чтобы не допустить их высыхания и опадения хвои. Общее количество модельных растений сеянцев сосны составляет 26 шт. В данной работе приведена характеристика 8-летних растений.

Камеральная обработка модельных деревьев начиналась с замачивания корневой системы отдельных сеянцев в ёмкости с водой в течение 2–3 суток. От корневой системы ручным способом отделялись размокшие частички грунта. Каждому растению присваивался индивидуальный номер. Производились измерения длины и ширины надземной и подземной части, длины всего сеянца и диаметр корневой шейки. Далее, ориентируясь на корневую шейку, с помощью ножа отделялась надземная и подземная части модельного дерева.

При анализе надземной части отделялся прирост на текущий год, а затем, ориентируясь по мутовкам, отделялись годичные приросты по основному стволику до корневой шейки. Для каждого осевого и бокового приростов определялся возраст и проводились измерения длины и диаметра (штангенциркуль Ермак 150 мм, МТ 001, ШЦ-1-150-0,1-1).

При характеристике корневой системы учитывались длина и диаметр главного корня и корней 2-го порядка. Измерялись длина (см) подземной части (от корневой шейки до окончания корневой системы по глубине формирования), ширина подземной части (размер

корневой системы по горизонтальному формированию), длина главного корня (от корневой шейки до окончания главного корня с учетом изгибов), длина корней второго порядка (суммарная длина корней второго порядка) на модельном растении.

От приростов и побегов с учетом возраста и положения в кроне отделялась хвоя. Подсчитывалось количество и длина хвои на отдельных приростах с учетом возраста.

Для определения массы части каждого растения с учетом возраста разделяли на осевые и боковые приросты, хвою, а также образцы главного корня и корней второго порядка; все образцы упаковывались в конверты и высушивались до воздушно-сухого состояния в термосушильном шкафу. Далее проводилось взвешивание образцов на весах (Professional Digital Miniscale TL-series).

Отдельные этапы работ фиксировались с использованием цифрового фотоаппарата (Nikon D40).

Полученные данные обрабатывались в программе Excel и Graph Pad Prism.

Результаты и обсуждение

При разработке буроугольного месторождения на территории карьерно-отвального комплекса был практически полностью разрушен природный флороценотический комплекс и сформировался техногенный ландшафт. На отвалах КБР в период 1982–1986 гг. проведены опытно-производственные работы по лесной рекультивации. По прошествии десятков лет сформировались лесные насаждения и наблюдается естественное возобновление сосны (рис. 2).



Рис. 2. Лесные культуры и естественное возобновление сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на отвалах Кумертауского буроугольного разреза на участке, прилегающем к лесным культурам

С учетом особенностей естественного возобновления сосны и отрицательного влияния травяного покрова на рост растений, в первые годы жизни [8; 16], для детального анализа морфологических особенностей использовались 8-летние растения.

При естественном возобновлении 8-летние растения вступают в период активного роста и развития. Мобилизация ростовых процессов обеспечивает выход за пределы прямого влияния травяного покрова. Известно, что по достижении высоты порядка 50 см подрост сосны с высокой вероятностью сформирует полноценный древостой [4; 5].

Поэтому для 8-летних растений из состава естественного возобновления на отвалах КБР проводилась оценка морфологических характеристик надземной и подземной частей.

Экспериментальная часть

На основании выполненных работ представлена характеристика морфологических особенностей 8-летних растений сосны естественного возобновления на отвалах КБР (рис. 3).



Рис. 3. Фотографии 8-летних сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) естественного возобновления на отвалах Кумертауского буровольного разреза

Надземная часть

У модельных 8-летних деревьев сосны характеризовались особенности формирования надземной части. Установлено, что сумма годичных осевых приростов у сосны № 19 составляет 14,8 см, у сосны № 7 – 15,2 см, у сосны № 10 – 17,0 см, у сосны № 23 – 23,2 см, у сосны № 12 – 76,1 см (рис. 4А). Сумма длин боковых приростов у сосны № 19 составляет 10,8 см, у сосны № 7 – 5,8 см, у сосны № 10 – 3,0 см, у сосны № 23 – 30,1 см, у сосны № 12 – 571,9 см. Эти значения получены в результате измерений длины мутовок, отдельно по осевому приросту и отдельно по боковым приростам. Показательно, что модельное растение №12 характеризуется максимальными размерами (рис. 3). При успешном росте сосны в высоту и выходе за уровень травяного покрова происходит активный рост и увеличение размеров кроны дерева, а также массы осевых и боковых приростов (рис. 4А, рис. 4Б).

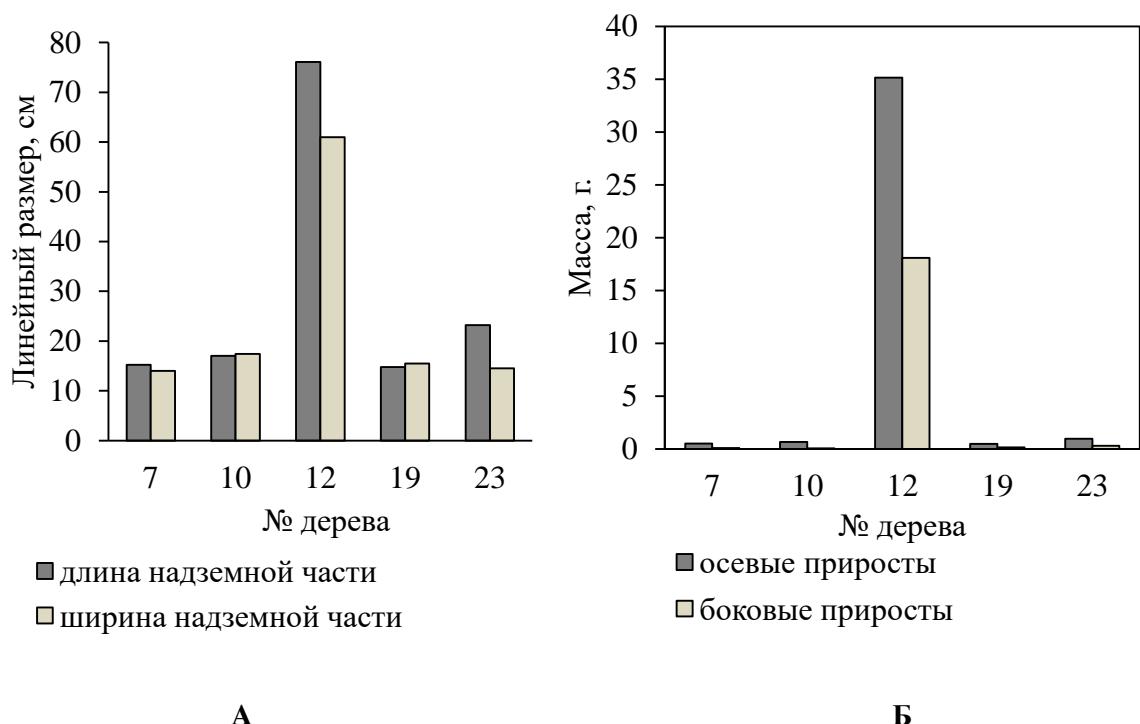


Рис. 4. Характеристика надземной части 8-летних растений естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (А – длина и ширина, см; Б – масса осевых и боковых побегов, г)

Получена характеристика боковых приростов самосева сосны. Количество значений для отдельных сеянцев сосны от 1 до 87. Среднее значение годичных боковых приростов составляет от 0,1 см до 6,57 см, максимальное значение – от 0,1 см до 21,0 см, минимальное значение – от 0,1 см до 3,0 см. Стандартное отклонение имеет значение от 0 до 4,98 см, а коэффициент вариации – до 157,3%. На основе описательной статистики установлена высокая изменчивость осевых и боковых приростов, что обусловлено индивидуальной траекторией развития сосен 8-летнего возраста, произрастающих на территории отвалов.

Показано, что в случае естественного возобновления успешный рост сеянцев сосны в высоту обеспечивает выход за пределы высоты травяного покрова. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему активному росту в высоту и увеличению размеров кроны растений. На рис. 4 представлено отношение длины к ширине сеянцев сосны. У модельных деревьев № 7, № 12 и № 23 доминирует длина надземной части, а у модельных деревьев № 10 и № 19 – более развита ширина надземной части. Установлено, что по массе осевых и боковых приростов у растений значительных отличий нет. Исключение представляет модельное дерево № 12, которое является самым развитым из 8-летних растений.

Успешность роста и развития растений связана с объемом ассимиляционного аппарата. Хвоя сосны была разделена по возрастам: от 1-летней до 5-летней. Установлено, что по количественным характеристикам хвоя 1-летнего возраста доминирует у деревьев № 7, № 12, № 23. У деревьев № 10 и № 19 в большей степени представлена хвоя 2-летнего возраста (рис. 5А). Однако, по массе на каждом 8-летнем дереве в большей степени представлена 1-летняя хвоя (рис. 5Б).

Как следует из рис. 5, 1-летняя хвоя в количественном отношении не всегда преобладает у модельных растений. У модельных деревьев № 10 и № 19 доминирует 2-летняя хвоя. При этом по массе у всех сеянцев сосны доминирует 1-летняя хвоя. Следует отметить, что наличие у модельных растений как 2- и 3-летней хвои является нормой для сосны обыкновенной. Факт сохранения хвои сосны до возраста 4 и 5 лет – показатель приспособления к экстремальным условиям произрастания.

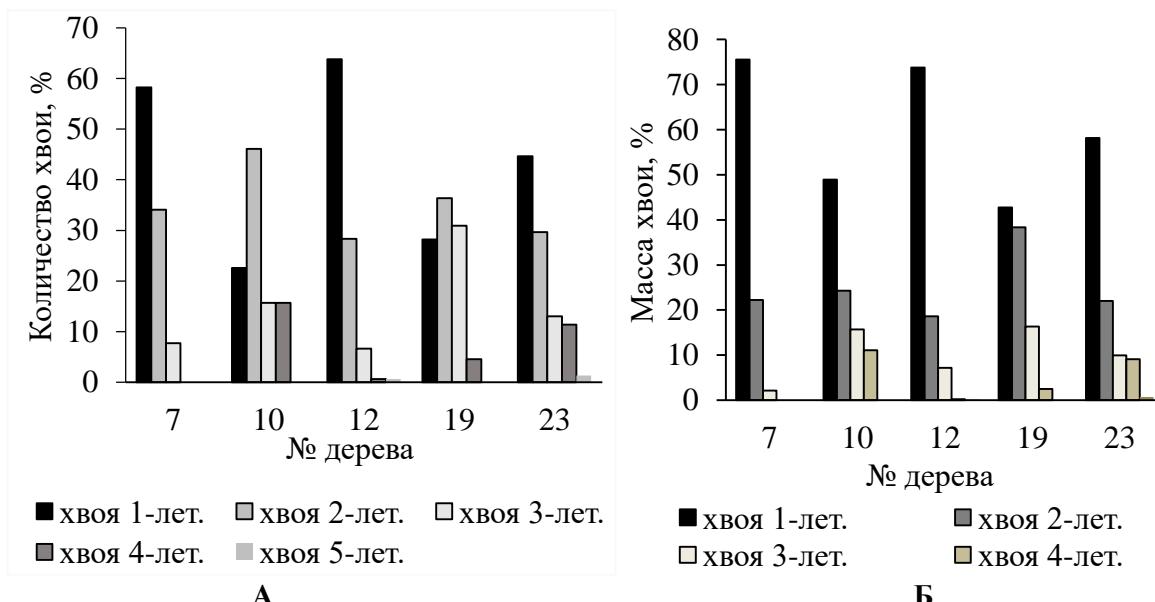


Рис. 5. Характеристика хвои разных возрастов 8-летних растений естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (А – количество хвои, %; Б – масса хвои на растении, %)

Модельное дерево № 7 является одним из слабых в плане развития как осевого и боковых приростов, так и корневой системы. Слабый рост и отсутствие многолетней хвои свидетельствует о сопряженной реакции снижения развития корневой системы, а также сокращения осевого и боковых приростов. При этом наблюдается компенсаторная адаптивная реакция таких растений за счет увеличения количества и массы 1-летней хвои. Это своеобразная реакция растения, которая обеспечивает выживание самосева сосны.

Подземная часть

Установлено, что минимальная длина подземной части сосны составляет 5,4 см, максимальная – 39,5 см. Минимальная ширина подземной части сосны составляет 1,0 см, максимальная – 49,5 см.

Минимальное значение массы корней второго порядка составляет 0,011 г, максимальное значение – 9,963 г. Среднее значение массы корней второго порядка составляет 1,305 г (стандартное отклонение – 2,293 г, стандартная ошибка среднего значения – 0,459 г). Коэффициент вариации 175,7%.

Обсуждение результатов

Высокие значения коэффициента вариации свидетельствуют об индивидуальной траектории развития каждого отдельного растения сосны при естественном возобновлении.

Это следует из характеристики сеянцев сосны 8-летнего возраста (возраст определен по осевым приростам), произрастающих на территории отвалов (табл. 1).

Растения 8-летнего возраста различаются по линейным показателям и массе корневой системы. Длина подземной части варьируется от 10 см до 34 см, ширина подземной части от 11 см до 54 см, масса главного корня от 0,204 г до 19,344 г, масса корней второго порядка от 0,121 г до 9,963 г.

Модельное дерево № 7 имеет наименьшие показатели длины подземной части, массы главного корня и корней второго порядка.

Таблица 1

Характеристика корневой системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) естественного возобновления на территории отвалов Кумертауского буровугольного разреза

№ дерева	Возраст, лет	Длина подземной части, см	Ширина подземной части, см	Масса главного корня, г.	Масса корней второго порядка, г.
7	8	10,0	17,5	0,204	0,121
10	8	14,0	13,0	0,492	0,184
19	8	16,0	11,0	0,256	0,302
23	8	20,5	14,5	0,842	1,181
12	8	34,0	54,0	19,344	9,963

У модельного дерева № 10 длина и ширина подземной части практически не отличаются. Модельное дерево № 19 имеет наименьшие размеры по ширине подземной части из представленных 8-летних модельных деревьев.

Для модельного дерева № 23 характерно сбалансированное развитие корневой системы по показателям глубины и ширины.

Модельное дерево № 12 является самым развитым из 8-летних модельных деревьев. Отметим, что надземная часть у этого растения также наиболее развитая и это закономерно.

В целом отмечается успешное формирование корневой системы сеянцев сосны при естественном возобновлении на отвалах КБР.

Заключение

Деревья сосны обыкновенной в лесных культурах на отвалах Кумертауского буровугольного разреза ежегодно плодоносят на протяжении последних двух десятилетий. Поступление семян в течение длительного периода обеспечивает успешное естественное возобновление сосны на отвалах.

Анализ архитектуры надземной и подземной частей подроста сосны обыкновенной при естественном возобновлении на промышленных отвалах свидетельствует о неравномерности развития растений. Для сосен 8-летнего возраста такие показатели, как длина надземной части, ширина надземной части, длина подземной части, ширина подземной части, размеры и масса осевых и боковых приростов, а также количество и масса хвои отличаются. Различия обусловлены изменчивостью сосны и индивидуальной траекторией развития каждого растения.

Морфологический анализ модельных деревьев сосны 8-летнего возраста, произрастающих в сходных условиях, позволяет установить ряд особенностей:

- растения различаются по высоте и ширине надземной части, различаются по глубине и ширине корневой системы;
- растения сосны при естественном возобновлении характеризуются как выраженным верхушечным приростом, так и ростом боковых побегов;
- на модельных 8-летних растениях сосны возраст хвои составляет от 1 года до 5 лет;
- на модельных деревьях сосны 1-летняя хвоя, как правило, преобладает как по количеству, так и по массе;
- корневая система модельных деревьев развивается пропорционально надземной части, что является подтверждением сбалансированного развития растений.

Выявленная изменчивость морфологических характеристик 8-летних растений сосны при естественном возобновлении является отражением адаптивных реакций на экстремальные условия произрастания на отвалах буроугольного месторождения. При естественном возобновлении происходит успешный рост и развитие растений сосны, что обеспечивает расширение территории лесопокрытой площади на отвалах.

Исследования выполнены на оборудовании центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».

Литература

1. Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В. и др. Методы изучения лесных сообществ. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2002. 240 с.
2. Баталов А.А., Мартынов Н.А., Кулагин А.Ю., Горюхин О.Б. Лесовосстановление на промышленных отвалах Предуралья и Южного Урала. Уфа: БНЦ УрО АН СССР. 1989. 140 с.
3. Бронникова Д.М., Шахринова Н.В. Временная изменчивость длины хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Приволжский научный вестник. 2016. № 11 (63). URL: <https://clck.ru/3QscZz> (дата обращения: 26.11.2025).
4. Давыдовичев А.Н., Кулагин А.Ю., Горичев Ю.П. Естественное подпологое возобновление и экологическая видоспецифичность пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) в подзоны широколиственно-темнохвойных лесов Южного Урала // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2016. Т. 26. № 3. С. 46-57.
5. Данченко М.А., Кабанов М.Н., Сперанский Н.И., Кабанов А.Н. Анализ подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в различных типах леса // Journal of Agriculture and Environment. 2025. № 2(54). <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.13>.
6. Ермакова М.В. Рост и формирование культур сосны при рекультивации дражных отвалов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26. № 6. С. 33-40.
7. Иозус А.П., Морозова Е.В. Морфологические и анатомические особенности хвои сосны обыкновенной разного географического происхождения в географических культурах Волгоградской области // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. С. 508.
8. Климова О.А., Уфимцев В.И. Влияние элементов рельефа на естественное возобновление древесных видов на отвалах вскрышных пород в условиях Северной лесостепи Кузнецкой котловины // Вестник КрасГАУ. 2014. № 6 (93). С. 197-201.

9. Красильников П.К. Методика полевого изучения подземных частей растений (с учетом специфики ресурсоведческих исследований). Л.: Наука, 1983. 208 с.
10. Кулагин А.Ю., Тагиров А.Р., Тельцова Л.З. Состояние лесных культур и формирование естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на отвалах Кумертауского бороугольного разреза // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2024. № 1 (49). С. 46-58. <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.49.4>.
11. Лебедев А.Г. Анализ изменчивости количественных признаков хвои в популяциях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. № 5. URL: <https://clck.ru/3QscZb> (дата обращения: 26.11.2025).
12. Моллаева М.З. Морфометрические параметры ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в горах Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. Т. 4, № 4. С. 406-414. <https://doi.org/10.31857/S0024114821040082>. EDN EILNVJ.
13. Мордась А.А., Раевский Б.В., Данилова Е.В. Изменчивость и взаимосвязь морфологических признаков и биометрических показателей сеянцев сосны обыкновенной // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2006. № 6. С. 26-33.
14. Туманик Н.В. Влияние способа рекультивации на формирование пигментного комплекса у сосны обыкновенной на техногенных землях // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16. № 3. С. 263-282.
15. Цандекова О.Л., Колмогорова Е.Ю. Анатомические и морфометрические характеристики *Pinus sylvestris* L., произрастающей на техногенно нарушенных землях угольного разреза «Кедровский» // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013. № 10(108). С. 059-063.
16. Castro J., Leverkus A.B. Effect of Herbaceous Layer Interference on the Post-Fire Regeneration of a Serotinous Pine (*Pinus pinaster* Aiton) across Two Seedling Ages // Forests. 2019. 10 (1). P. 74. <https://doi.org/10.3390/f10010074>.
17. Łabiszak B., Lewandowska-Wosik A., Pawlaczyk E.M., Urbaniak L. Variability of morphological needle traits of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) among populations from mountain and lowland regions of Poland // Folia Forestalia Polonica, vol. 59, no. 2, Forest Research Institute. 2017. P. 134-145. <https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0013>.
18. Sangüesa-Barreda G., Gazol A., Camarero J.J. Drops in needle production are early-warning signals of drought-triggered dieback in Scots pine // Trees. 2023. № 37. P. 1137-1151 <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02412-6>.

References

1. Andreeva, E.N., & Bakkal, I.Yu., Gorshkov, V.V. i dr. (2002). Metody` izucheniya lesny`x soobshhestv. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny`j universitet, 240. (in Russ.).
2. Batalov, A.A., Mart`yanov, N.A., Kulagin, A.Yu., & Goryuxin, O.B. (1989). Lesovosstanovlenie na promy`shlenny`x otvalax Predural`ya i Yuzhnogo Urala. Ufa: BNCz UrO AN SSSR, 140. (in Russ.).
3. Bronnikova, D.M., & Shaxrinova, N.V. (2016). Vremennaya izmenchivost` dliny` xvoi sosny` oby`knovennoj (*Pinus sylvestris* L.). *Privolzhskij nauchny`j vestnik*, 11(63). URL: <https://clck.ru/3QscZz> (data obrashheniya: 26.11.2025). (in Russ.).
4. Davy`dy`chev, A.N., Kulagin, A.Yu., & Gorichev, Yu.P. (2016). Estestvennoe podpologovoe vozobnovlenie i e`kologicheskaya vidospecifichnost` pixty` sibirskoj (*Abies sibirica* Ledeb.) v podzony`

широколиственно-темновохвойных лесов Южного Урала. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*, 26, 3, 46-57. (in Russ.).

5. Danchenko, M.A., Kabanov, M.N., Speranskij, N.I., & Kabanov, A.N. (2025). Analiz podrosta sosny` oby`knovennoj (*Pinus sylvestris*) v razlichny`x tipax lesa. *Journal of Agriculture and Environment*, 2(54). <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.13>. (in Russ.).
6. Ermakova, M.V. (2022). Rost i formirovanie kul`tur sosny` pri rekultivacii drazhny`x otvalov. *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*, 26, 6, 33-40. (in Russ.).
7. Iozus, A.P., & Morozova, E.V. (2015). Morfologicheskie i anatomicheskie osobennosti xvoi sosny` oby`knovennoj raznogo geograficheskogo proisxozhdeniya v geograficheskix kul`turax Volgogradskoj oblasti. Sovremenny`e problemy` nauki i obrazovaniya, 4, 508. (in Russ.).
8. Klimova, O.A., Ufimcev, V.I. (2014). Vliyanie e`lementov rel`efa na estestvennoe vozobnovlenie drevesny`x vidov na otvalax vskry`shny`x porod v usloviyah Severnoj lesostepi Kuzneczkoj kotloviny`. *Vestnik KrasGAU*, 6(93), 197-201. (in Russ.).
9. Krasil`nikov, P.K. (1983). Metodika polevogo izucheniya podzemny`x chastej rastenij (s uchetom specifiki resursovedcheskix issledovanij). L.: Nauka, 208 s. (in Russ.).
10. Kulagin, A.Yu., Tagirov, A.R., & Tel`czova, L.Z. (2024). Sostoyanie lesny`x kul`tur i formirovanie estestvennogo vozobnovleniya sosny` oby`knovennoj (*Pinus sylvestris* L.) na otvalax Kumertauskogo burougol`nogo razreza. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. E`lektronny`j nauchny`j zhurnal*, 1(49), 46-58. <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.49.4>. (in Russ.).
11. Lebedev, A.G. (2014). Analiz izmenchivostii kolichestvenny`x priznakov xvoi v populyaciayax sosny` oby`knovennoj (*Pinus sylvestris* L.). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 5. URL: <https://clck.ru/3QscZb> (data obrashheniya: 26.11.2025). (in Russ.).
12. Mollaeva, M.Z. (2021). Morfometricheskie parametry` assimilyacionnogo apparata sosny` oby`knovennoj v gorax Central`nogo Kavkaza. *Lesovedenie*, 4, 4, 406-414. <https://doi.org/10.31857/S0024114821040082>. EDN EILNVJ. (in Russ.).
13. Mordas`, A.A., RaevskijB.V., & DanilovaE.V. (2006). Izmenchivost` i vzaimosvyaz` morfologicheskix priznakov i biometricheskix pokazatelej seyancev sosny` oby`knovennoj. *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 6, 26-33. (in Russ.).
14. Tumanik, N.V. (2024). Vliyanie sposoba rekul`tivacii na formirovanie pigmentnogo kompleksa u sosny` oby`knovennoj na texnogennyy`x zemlyax. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16, 3, 263-282. (in Russ.).
15. Czandekova, O.L., & Kolmogorova, E.Yu. (2013). Anatomicheskie i morfometricheskie xarakteristiki *Pinus sylvestris* L., proizrastayushhej na texnogenno narushenny`x zemlyax ugol`nogo razreza «Kedrovskij». *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 10(108), 059-063. (in Russ.).
16. Castro, J., & Leverkus, A.B. (2019). Effect of Herbaceous Layer Interference on the Post-Fire Regeneration of a Serotinous Pine (*Pinus pinaster* Aiton) across Two Seedling Ages. *Forests*, 10 (1), 74. <https://doi.org/10.3390/f10010074>.
17. Łabiszak, B., Lewandowska-Wosik ,A., Pawlaczyk, E.M., & Urbaniak, L. (2017). Variability of morphological needle traits of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) among populations from mountain and

lowland regions of Poland. *Folia Forestalia Polonica*, 59, 2, Forest Research Institute. 134-145.
<https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0013>.

18. Sangüesa-Barreda, G., Gazol, A., & Camarero, J.J. (2023). Drops in needle production are early-warning signals of drought-triggered dieback in Scots pine. *Trees*. 37, 1137-1151
<https://doi.org/10.1007/s00468-023-02412-6>.

дата поступления: 22.10.2025

дата принятия: 08.12.2025

© Тагиров А.Р., 2025

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННЫХ РИТМОВ РОСТА И РАЗВИТИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *COREOPSIS* L. И НАКОПЛЕНИЕ В ИХ СОЦВЕТИЯХ АНТИОКСИДАНТОВ

E.S. Chichkanova, O.A. Grebennikova

FEATURES OF SEASONAL RHYTHMS OF GROWTH AND DEVELOPMENT OF REPRESENTATIVES OF THE GENUS *COREOPSIS* L. AND THE ACCUMULATION OF ANTIOXIDANT SUBSTANCES IN THEIR INFLORESCENCES

Аннотация. В статье приведены результаты изучения особенностей роста и развития 5 исследуемых представителей рода *Coreopsis* L.: *C. basalis* (A. Dietr.) S.F. Blake, *C. grandiflora* Hogg. ex Sweet., *C. grandiflora* cv ‘Plena’, *C. lanceolata* L., *C. major* Walt., произрастающих в условиях открытого грунта Никитского ботанического сада. Определено содержание сухого вещества, аскорбиновой кислоты и каротиноидов в соцветиях этих растений. Установлено, что изученные представители рода *Coreopsis*, в условиях интродукции на Южном берегу Крыма проходят полный цикл роста и развития, включая цветение и плодоношение. У видов *C. basalis*, *C. grandiflora* и сорта *C. grandiflora* cv ‘Plena’ наступают повторные фазы: «бутонизация» и «цветение», с последующим наступлением повторной фазы «плодоношение». Определено ключевое значение биологического минимума температуры воздуха от +5,0°C необходимое для начала наступления вегетационного периода у растений и наступления фаз генеративной сферы развития. Установлены суммы активных температур воздуха, накапливаемых к началу наступления фаз «бутонизация» (от 696,9°C до 2271,8°C), «цветение» (от 1068,2°C до 1301,2°C), «плодоношение» (от 1694,0°C до 2568,8°C) для разных представителей рода *Coreopsis*. Наибольшую концентрацию аскорбиновой кислоты и каротиноидов в соцветиях, наблюдали у *C. grandiflora* cv. ‘Plena’, *C. lanceolata*, *C. basalis*. Высоким содержанием сухих веществ отличались *C. lanceolata* и *C. major*. Таким образом, более приспособленными представителями рода *Coreopsis* к эколого-климатическим условиям, в частности, к температуре воздуха являются изученные виды – *C. basalis*, *C. grandiflora*, *C. lanceolata*. В связи с достаточно высоким содержанием в растительном сырье этих растений каротиноидов и аскорбиновой кислоты, их можно считать перспективными культурами для

Abstract. The article presents the results of a study of the growth and development characteristics of five studied representatives of the genus *Coreopsis* L. – *C. basalis* (A. Dietr.) S.F. Blake, *C. grandiflora* Hogg. ex Sweet., *C. grandiflora* cv ‘Plena’, *C. lanceolata* L., *C. major* Walt. growing in the open ground conditions of the Nikitsky Botanical Garden. The content of dry matter, ascorbate and carotenoids in the inflorescences of these plants was determined. It was established that the studied representatives of the genus *Coreopsis*, under the conditions of introduction on the southern coast of Crimea, undergo a full growth and development cycle, including flowering and fruiting. In the species *C. basalis*, *C. grandiflora* and the variety *C. grandiflora* cv ‘Plena’, repeated phases of “budding” and “flowering” occur, followed by the onset of a repeated phase of “fruiting”. The key value of biological minimum air temperature from +5.0°C, necessary for the onset of the growing season in plants and the onset of the generative development phases, has been determined. The sums of active air temperatures accumulated by the onset of the following phases have been established: “budding” (from 696.9°C to 2271.8°C), “flowering” (from 1068.2°C to 1301.2°C), “fruiting” (from 1694.0°C to 2568.8°C) for different representatives of the genus *Coreopsis*. The highest concentration of ascorbic acid and carotenoids in inflorescences was observed in *C. grandiflora* cv. ‘Plena’, *C. lanceolata*, *C. basalis*. *C. lanceolata* and *C. major* were distinguished by a high dry matter content. Thus, the studied species of the genus *Coreopsis* – *C. basalis*, *C. grandiflora*, and *C. lanceolata* – are better adapted to ecological and climatic conditions. Due to the relatively high content of carotenoids and ascorbic acid in the plant material of these plants, they can be considered promising crops for the pharmaceutical industry. It should be noted that further in-depth study of certain pharmacological

фармацевтической промышленности. Следует отметить, что в дальнейшем целесообразно проводить более глубокое изучение некоторых фармакологических показателей, а также хозяйствственно-ценных, агротехнических признаков выше представленных видов, с последующей возможностью применения растительного сырья кореопсисов в фармацевтической индустрии.

Ключевые слова: кореопсисы; фенология; аскорбиновая кислота; каротиноиды; сухое вещество; открытый грунт; Никитский ботанический сад; Южный берег Крыма.

Сведения об авторах: Чичканова Елена Сергеевна, SPIN-код: 4703-2678, канд. биол. наук, Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, г. Ялта, Россия, lena.chichkanovarevenko@mail.ru; Гребенникова Оксана Анатольевна, канд. биол. наук, Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, г. Ялта, Россия, oksanagrebennikova@yandex.ru.

indicators, as well as the economically valuable agronomic traits of the above-mentioned species, is advisable, with the subsequent potential use of coreopsis plant material in the pharmaceutical industry.

Key words: coreopsis; phenology; ascorbic acid; carotenoids; dry matter; open ground; Nikitsky Botanical Garden; Southern Coast of Crimea.

About the authors: Elena S. Chichkanova, SPIN-code: 4703-2678, Candidate of Biological Sciences, Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden – National Science Center of the Russian Academy of Sciences, Yalta, Russia, lena.chichkanovarevenko@mail.ru; Oksana A. Grebennikova, Candidate of Biological Sciences, Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden – National Science Center of the Russian Academy of Sciences, Yalta, Russia, oksanagrebennikova@yandex.ru.

Чичканова Е.С., Гребенникова О.А. Особенности сезонных ритмов роста и развития представителей рода *Coreopsis* L. и накопление в их соцветиях антиоксидантов // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 56-69. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/05>

Chichkanova, E.S., & Grebennikova, O.A. (2025). Features of Seasonal Rhythms of Growth and Development of Representatives of the Genus *Coreopsis* L. and the Accumulation of Antioxidant Substances in their Inflorescences. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 56-69. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/05>

Введение

Род *Coreopsis* L. (семейство Asteraceae) объединяет виды с природным ареалом в Северной, Центральной и Южной Америке. В основном представители этого рода используются в озеленении, в пищевой (фиточай) и лёгкой (красители) промышленности [22].

Виды рода *Coreopsis* вызывают особый интерес. В настоящее время имеется ряд работ, посвященных изучению биохимического состава [1; 3; 5; 20; 25-27], биологической активности [6], сезонных ритмов роста и развития [10; 13; 24], динамики коллекционных фондов рода *Coreopsis* [8; 21]. Эти аспекты изучаются для определения возможности применения растительного сырья кореопсисов в пищевой и фармацевтической отраслях промышленности. И в медицине. А также для внедрения новых видов и сортов рода *Coreopsis* в коллекции ботанических Садов [10].

В коллекции Никитского ботанического сада, расположенного на Южном берегу Крыма (ЮБК), в зоне сухого субтропического климата средиземноморского типа интродукционное изучение проходили шесть видов рода *Coreopsis*: *C. basalis* (A. Dietr.) S.F.

Blake., *C. grandiflora* L., *C. lanceolata* L., *C. longipes* Hook., *C. major* Walt., *C. tripteris* L., 1 форма – *Coreopsis tinctoria* f. *atropurpurea* (Hook.) Fernald и два сорта: *C. grandiflora* “Plena”, *C. lanceolata* “Sterntaler”.

Цель работы: на основе комплексного анализа (изучения особенностей роста и развития, определения содержания некоторых антиоксидантов в соцветиях растений) нужно выявить наиболее перспективные для возможного применения в фармацевтической индустрии виды рода *Coreopsis*.

В связи с поставленной **целью**, задачами наших исследований являлось:

- изучение сезонных ритмов роста и развития кореопсисов;
- определение содержания аскорбиновой кислоты и каротиноидов в соцветиях – *C. basalis*, *C. grandiflora*, *C. grandiflora* cv. “Plena”, *C. lanceolata*, *C. major* рода *Coreopsis*, представленного в коллекции Никитского ботанического сада.

Методы исследования: Объектами исследования являлись пять представителей рода *Coreopsis* L.: *C. basalis* (A. Dietr.) S.F. Blake, *C. grandiflora* Hogg. ex Sweet., *C. grandiflora* cv. “Plena”, *C. lanceolata* L., *C. major* Walt.

Получены средние даты наступления фенологических фаз изученных видов рода *Coreopsis* за 2020, 2021, 2023 гг., а также проведена их статистическая обработка с помощью программы Statistica 5.0.

Оценка сезонного роста и развития у кореопсисов проведена согласно «Методике фенологических наблюдений в ботанических садах СССР» [12]. Приводится характеристика природных условий западного южнобережного субтропического района (от мыса Ая до горы Кастель, включая земли городского округа Ялты и западной части городского округа Алушты).

Климат засушливый жаркий субтропический, с умеренно-теплой зимой. Средняя годовая температура воздуха – +12,0–+14,0°C холодного месяца (февраль) – +2,5–+4,5°C, самого теплого (июль, август) – +23,0–+25,0°C. Безморозный период длится 259 дней, вегетационный – 212. Сумма температур выше 10,0°C составляет 3940°C. При годовом количестве осадков 550 мм, в вегетационное время выпадает 260 мм. Годовая испаряемость воды – 900–1100 мм. Рельеф ступенчато-террасный, овражно-балочный. Радиационный баланс Южнобережного климатического района равен – 53 ккал/см², причем на испарение расходуется 21,6 ккал/см².

По многолетним данным Агрометеостанции Никитского сада, поселка городского типа (далее – пгт) Никита, как места интродукции представителей изучаемого рода, климатические условия на территории Никитского сада характеризуются годовой нормой осадков – 589 мм, абсолютный минимум температур –14,6°C. Абсолютный максимум +39,0°C, средняя годовая температура – +12,4°C.

Приводим сведения о некоторых эколого-климатических условиях за 2020, 2021, 2023 гг. (табл. 1-3).

Таблица 1

Средние арифметические значения температуры (°С) воздуха ±ошибка среднего (M±m) за годы исследования (2020, 2021 и 2023) в пгт Никита, Никитский ботанический сад

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2020	9,5±0,6	19,7±2,3	19,1±1,8	26,5±1,9	23,6±2,2	23,4 ± 1,5
2021	9,2±0,7	16,4±1,4	19,7±2,6	28,7±1,8	24,2±1,7	19,7±2,9
2023	12,0±0,6	17,6±1,4	20,9±0,6	24,0±0,3	28,1±0,4	21,0±0,5

Таблица 2

Средние арифметические значения влажности воздуха выраженной в % ±ошибка среднего (M±m) за годы исследования (2020, 2021 и 2023) в пгт Никита, Никитский ботанический сад

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2020	63,0±1,5	62,0±2	69,0±1,5	53,0±2,5	53,0±3,0	54,0±2,0
2021	60,2±1,2	65,0±1	70,3±1,2	58,3±2,4	53,6±2,3	55,0±4,5
2023	74,0±1,7	48,0±1,5	75,0±2,8	58,0±1,7	50,0±2,4	51,0±2,3

Таблица 3

Средние арифметические значения осадков (мм) ±ошибка среднего (M±m) за годы исследования (2020, 2021 и 2023) в пгт Никита, Никитский ботанический сад

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2020	16,4±5,0	30,7±7,0	34,2±1,0	4,9±1,2	1,6±0,8	0,4±0
2021	15,9±1,2	6,0±5,6	59,0±1,0	29,5±4,5	48,8±10,0	16,6±1,2
2023	8,1±1,0	4,0±3,0	30,9±1,2	2,4±2,3	1,3±1,0	0

Сумму накопленных активных температур воздуха (при которых у растений наступали фазы: «вегетация», «бутонизация», «цветение», «плодоношение»), рассчитывали согласно методическому пособию Л.С. Кельчевской [11].

Сбор соцветий для определения концентрации антиоксидантов осуществляли при массовом и обильном цветении кореопсисов в период с первой по вторую декады июня, а для *C. basalis* – в третью декаду июля (рис. 1). Все отобранные соцветия кореопсисов использовали для извлечения и дальнейшего исследования содержания некоторых биологически активных веществ (аскорбиновой кислоты, каротиноидов). Определяли процентное содержание сухого вещества. Концентрацию аскорбиновой кислоты определяли йодометрическим титрованием [14], каротиноидов – спектрофотометрически в ацетоновых экстрактах [15]. Содержание сухого вещества определяли гравиметрическим методом [15]. Статистическую обработку данных проводили с помощью методического пособия Матвеева В.А. «Статистика» [9]. На рисунке 2 представлены среднеарифметические значения ± ошибка среднего.

Результаты

Особенности сезонных ритмов роста и развития кореопсисов в условиях открытого грунта в Никитском ботаническом саду. Кореопсис (лат. *Coreopsis* L.), Парижская

красавица, или Ленок – род травянистых цветковых однолетних, или многолетних растений семейства Сложноцветные, или Астровые. В роду более ста видов растений, разделенных на 11 секций. Около тридцати видов происходят из Северной Америки, а остальные – из Южной и Центральной Америки. Некоторые кореопсисы иногда ошибочно относят к роду Череда, и наоборот: часть растений рода Череда причисляют к роду кореопсис.

Посев семян кореопсисов в открытый грунт осуществляли в мае, в теплице – в середине апреля. Посев многолетника на рассаду – в начале марта, пересадка сеянцев в грунт – в конце мая. Цветение: с июля по октябрь. Растения предпочитают яркий солнечный свет. Для некоторых видов предпочтительней полутень. Почва влажная, рыхлая, легкая. Хорошо дренированная, не слишком плодородная, нейтральной реакции. Полив регулярный и умеренный, пока сеянцы не окрепнут. Взрослые растения нуждаются в поливе только в засушливое время. Подкормки осуществляли раствором комплексного минерального удобрения. Размножали растения семенами, черенками и делением кустов [22].

Все исследуемые представители рода *Coreopsis* являются ранневегетирующими растениями. У которых рост наступал в начале первой декады марта (02.03 ± 2 дня), при повышении температуры воздуха от $+5,0^{\circ}\text{C}$.

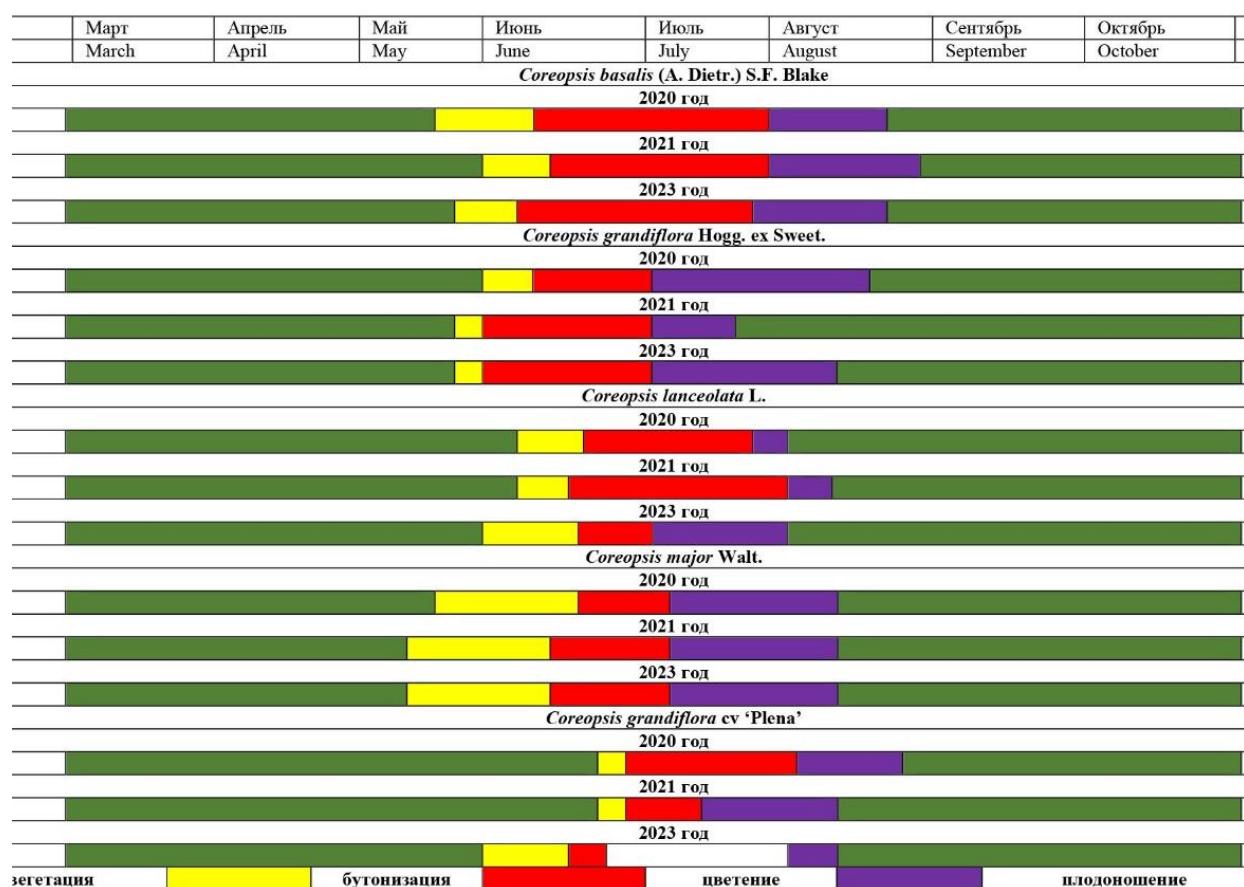


Рис. 1. Феноспектры представителей рода *Coreopsis* L. в условиях открытого грунта Никитского ботанического сада

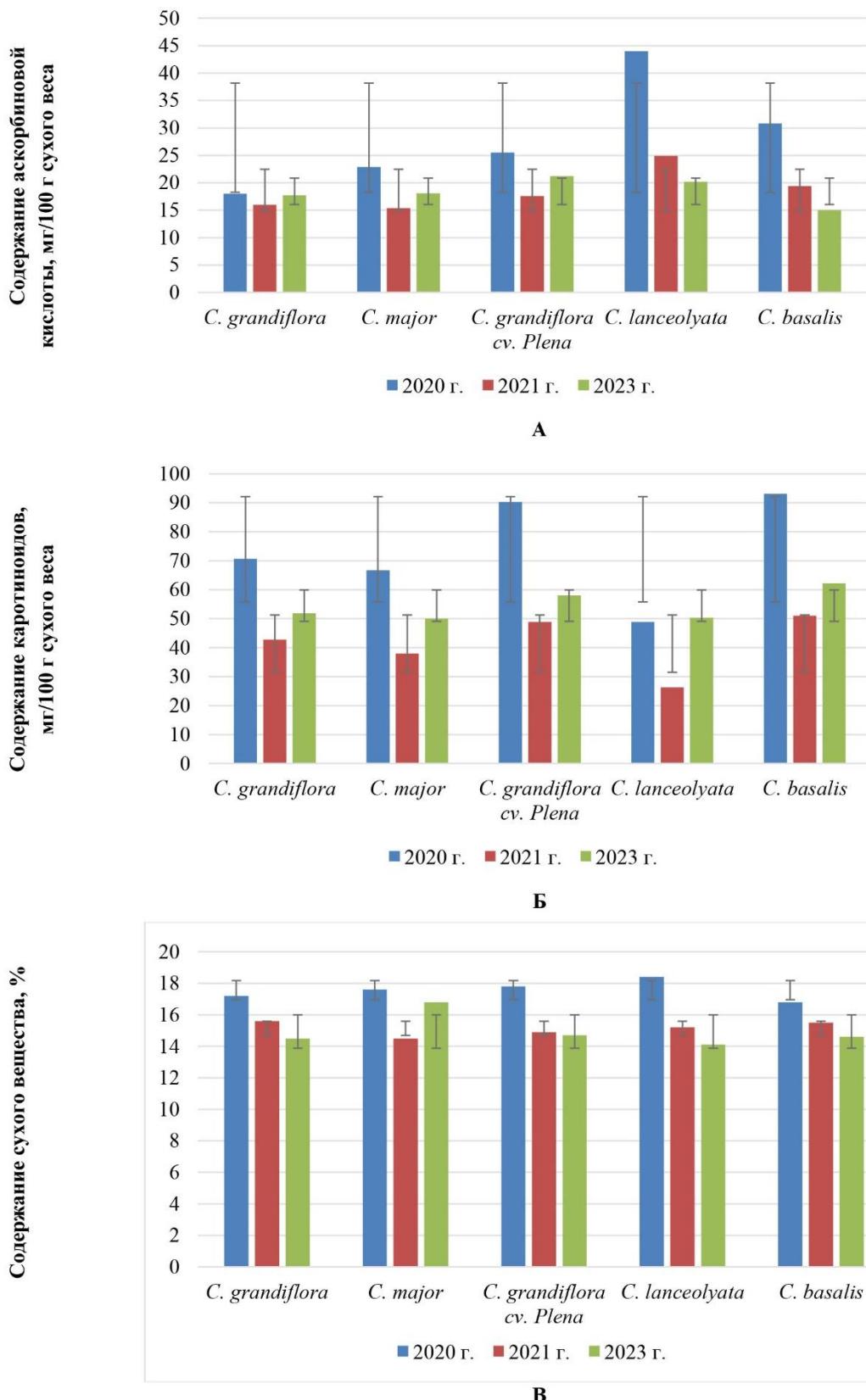


Рис. 2. Содержание аскорбиновой кислоты (А), каротиноидов (Б) и сухого вещества (В) в соцветиях кореопсисов

Все растения вступают в фазу «бутонизация». Установлено, что от начала роста и развития, у представителей рода *Coreopsis*, до наступления фазы «бутонизация» потребовалось суммы активных температур воздуха от 696,9°C для *C. major*, 945,1°C для *C. basalis* и *C. grandiflora*, до 1068,2°C для *C. lanceolata* и *C. grandiflora* cv “Plena”. Фаза бутонизация у *C. major* происходила с начала второй декады мая, при среднедекадной температуре воздуха – +16,7°C и относительной влажности воздуха – 76,5%; у 2 представителей – *C. lanceolata* и *C. grandiflora* cv. “Plena” фаза «бутонизация» начиналась с первой декады июня, при среднедекадной температуре воздуха +18,5°C и относительной влажности воздуха – 62,5%.

Исходя из выше сказанного, мы можем отметить, что наиболее приспособленными к температуре воздуха являются – *C. major*, *C. basalis* и *C. grandiflora*. Им потребовалась наименьшая сумма активных температур воздуха для наступления фазы «бутонизация».

Наиболее раннее наступление фазы «бутонизация» в 2020 г происходила у *C. basalis* (рис. 1). Вероятнее всего, это обусловлено наиболее высокими показателями температуры воздуха за 2020 г., в сравнении с 2021 и 2023 гг. (табл. 1).

Для остальных представителей рода *Coreopsis* – *C. grandiflora*, *C. lanceolata*, *C. major*, *C. grandiflora* cv “Plena” наиболее ранее наступление фазы «бутонизация» происходила с наступлением последующих фаз развития – «цветение» и «плодоношение» в 2023 г. (рис. 1, табл. 3).

В связи с тем, что виды кореопсисов являются декоративной культурой и в значительной степени привлекают своим обилием цветения, то по результатам 3-летних фенологических наблюдений, по началу наступления генеративного периода и, в частности, наступления фазы «цветение», изученные представители были распределены в 2 группы: *ранне-* и *среднецветущие* растения. К первой группе отнесен – *C. grandiflora*, цветение которого начиналось с третьей декады мая при среднем значении (за 3-х летний период) температуры воздуха за декаду +17,0°C, при относительной влажности воздуха – 76,5%. Остальные виды отнесены ко второй группе – «*среднецветущие*» растения.

Фаза «цветение» у всех исследуемых представителей наступала практически в один и тот же летний период. А именно, с первой по вторую декады июня, при среднедекадных температурах воздуха – +18,5 и +20,9°C и относительной влажности воздуха – 62,5 и 73,3%, соответственно, для 1-й и 2-й декады. Длилось цветение у исследуемых растений до первой и второй декады (*C. lanceolata*, *C. major*, *C. grandiflora* cv “Plena”) по третью (*C. basalis*, *C. grandiflora*) декады июля.

Установлено, что от начала вегетации у представителей рода *Coreopsis* до наступления фазы «цветение» потребовалась сумма активных температур воздуха от 1068,2°C для *C. grandiflora*, 1152,2°C для *C. major*, 1193,1°C для *C. basalis*, 1259,6°C для *C. grandiflora* cv “Plena” до 1301,2°C для *C. lanceolata*.

Исходя из вышесказанного, мы можем отметить, что наиболее приспособленными к температуре воздуха являются *C. grandiflora* и *C. major*. Им потребовалась наименьшая сумма активных температур воздуха для наступления фазы «цветение».

У исследуемых представителей рода *Coreopsis* фаза «плодоношение» наступала с первой декады июля до первой декады августа, в зависимости от исследуемого вида (см. рис. 1). Так, у вида *C. grandiflora* фаза «плодоношение» наступала в конце третьей декады июня – в начале

первой декады июля, при среднедекадной температуре воздуха – +22,6°C и относительной влажности воздуха – 70,5%. У *C. lanceolata* и *C. major* в первой декаде июля при среднедекадной температуре воздуха – +25,1°C, относительной влажности воздуха – 56,3%, а у *C. basalis* плодоношение наступало в третьей декаде июля при средней температуре воздуха – +24,9°C, относительной влажности воздуха – 58%. Наиболее позднее наступление фазы «плодоношение» происходило у *C. grandiflora* cv “Plena” с первой декады августа при среднедекадной температуре воздуха – +25,6°C, относительной влажности воздуха – 43,6%. Сбор семян у всех представителей рода *Coreopsis*, как правило, осуществлялся с первой и второй декады августа и до конца третьей декады сентября.

Установлено, что от начала роста и развития видов рода *Coreopsis* (при температуре воздуха от +5,0°C) до наступления фазы «плодоношение» потребовалась сумма активных температур воздуха от 1694,0°C для *C. grandiflora*, 1921,2°C для *C. lanceolata* и *C. major*, 2363,8°C для *C. basalis* и до 2568,8°C для *C. grandiflora* cv “Plena”.

Таким образом, согласно нашим сведениям наиболее приспособленными к температуре воздуха являются – *C. grandiflora*, *C. lanceolata*, *C. major*. Им потребовалась наименьшая сумма активных температур воздуха для наступления фазы «плодоношение».

Следует отметить, что в целом все исследуемые представители рода *Coreopsis* – *C. basalis*, *C. grandiflora*, *C. lanceolata*, *C. major* и сорт *C. grandiflora* cv “Plena” проходят полный цикл роста и развития в условиях открытого грунта на ЮБК. От наступления фазы «вегетация» до наступления фазы «плодоношение» и дальнейшего самостоятельного обсеменения этих растений. У видов *C. basalis*, *C. grandiflora* и сорта *C. grandiflora* cv “Plena” наступали повторные фазы «бутонизация» и «цветение» с последующим наступлением фазы «плодоношение» (см. рис. 1). На основе анализа сезонных особенностей роста и развития (по фазам: «бутонизация», «цветение», «плодоношение») можно отметить, что наиболее адаптированными и приспособленными представителями рода *Coreopsis* к экологоклиматическим условиям вероятнее всего являются – *C. basalis*, *C. grandiflora*, *C. lanceolata*, *C. major*. Этим растениям потребовалась наименьшая сумма активных температур воздуха для наступления основных фенологических фаз роста и развития.

Содержание низкомолекулярных антиоксидантов и сухого вещества в соцветиях исследуемых представителей рода Coreopsis.

Измеряли некоторые низкомолекулярные антиоксиданты на примере аскорбиновой кислоты и каротиноидов. Следует отметить, что основная роль антиоксидантов заключается в ингибировании окислительного процесса и нейтрализации действия свободных радикалов, а также в предотвращении разрушительного действия свободных радикалов на клетки и замедлении процесса их старения [4].

В результате определения содержания антиоксидантов, рассчитанных на сухое вещество и сухого вещества в соцветиях разных видов рода *Coreopsis* за 2020, 2021, 2023 гг. установлено, что собранные в период массового цветения соцветия, накапливали значительные количества данных соединений: 15,0–44,0 мг аскорбиновой кислоты/100 г сухого веса, 26,3–93,1 мг каротиноидов/100 г сухого веса и 14,1–18,4% сухого вещества (рис. 2).

Следует отметить, что содержание аскорбиновой кислоты в цветках у ромашки аптечной составляет 17,3 мг/100 г сухого веса [16]. В цветках календулы лекарственной, которая во многих странах мира признана как лекарственное растение, благодаря накоплению большого числа разнообразных классов биологически активных веществ, концентрация каротиноидов варьирует в пределах от 33,5 до 101,5 мг/100 г сухого веса [2; 7]. В цветках одуванчика лекарственного содержание каротиноидов составляет 14,0 мг/100 г сухого веса и т.д. [19].

Анализируя накопление аскорбиновой кислоты в соцветиях изученных видов/сортов кореопсиса в течение 3-х лет можно отметить, что ее количественное содержание значительно отличалось по годам, что, вероятно, связано с погодными особенностями конкретного года. Максимальное накопление аскорбиновой кислоты отмечено у всех видов кореопсиса в 2020 г., в сравнении с 2021 и 2023 гг. В 2021 г. у исследуемых представителей выявили минимальное накопление аскорбиновой кислоты в соцветиях.

Этому, вероятно, способствовали как самая высокая среднедекадная температура воздуха +22,1°C (в сравнении с другими годами исследования), так и, превышающая показатели других лет, сумма активных температур воздуха, накопленной от начала наступления фазы «вегетация» кореопсисов до начала наступления фазы «цветение» – 1312,7°C, (см. табл. 1).

Подтверждением этому является установленная нами высокая положительная корреляционная связь между содержанием аскорбиновой кислоты в соцветиях всех представителей рода *Coreopsis* с температурой воздуха ($R^2=0,997$; $p = 0,070$). Установлено, что максимальной концентрацией аскорбиновой кислоты в соцветиях практически во все годы выделялся вид *C. lanceolata*. Высокое содержание аскорбиновой кислоты в соцветиях также было характерно для видов *C. basalis* и *C. grandiflora* cv. “Plena” (рис. 2А).

Содержание каротиноидов в соцветиях кореопсисов на протяжении 3-х лет также значительно варьировало по годам. В накоплении каротиноидов прослеживалась аналогичная тенденция к снижению и повышению содержания в зависимости от определённого года. Так, у всех представителей рода *Coreopsis* содержание каротиноидов в соцветиях в 2020 г. было максимальным; а в 2021 г. – минимальным. Наибольшее содержание каротиноидов за 2020, 2021, 2023 гг. выявлено у *C. basalis* и *C. grandiflora* cv. “Plena” (рис. 2Б).

Наблюдалась тенденция к увеличению количества каротиноидов при возрастании температуры воздуха в определенных годах, однако корреляционная связь была недостоверной ($R^2=0,652$; $p = 0,402$).

Содержание сухих веществ не отличалось высокой вариабельностью среди исследуемых видов и сорта кореопсисов по годам. При этом содержание сухого вещества в соцветиях кореопсисов также максимально накапливалось в 2020 г. у всех исследуемых растений. Такие особенности накопления соединений могут быть связаны как с высокой среднедекадной температурой воздуха в этом году, так и с оптимальными условиями вегетации. А именно, с достаточным содержанием влаги в почве благодаря большому количеству осадков. Высоким содержанием сухого вещества отличались представители *C. lanceolata*, *C. grandiflora* cv. “Plena” и *C. major* (рис. 2В; см. табл. 1).



В целом, все исследуемые представители рода *Coreopsis* – *C. basalis*, *C. grandiflora*, *C. lanceolata*, *C. major* и сорт *C. grandiflora* cv. “Plena” проходят полный цикл роста и развития в условиях открытого грунта на ЮБК. Виды *C. basalis*, *C. grandiflora* и сорт *C. grandiflora* cv “Plena” вступали в повторные фазы «бутонизация» и «цветение» с последующим наступлением фазы «плодоношение». Наиболее адаптированными и приспособленными представителями рода *Coreopsis* к эколого-климатическим условиям являются *C. grandiflora*, *C. basalis*, *C. lanceolata*, *C. major*.

В результате изучения содержания антиоксидантов в соцветиях разных представителей рода *Coreopsis* за 2020, 2021, 2023 гг. было установлено, что собранные в вышеуказанный период соцветия, накапливали значительное количество аскорбиновой кислоты и каротиноидов, наряду с высоким содержанием сухого вещества. Выявлено, что наибольшее количество аскорбиновой кислоты, во все годы исследования, содержалось у *C. lanceolata*, каротиноидов у *C. basalis* и *C. grandiflora* cv. “Plena”. Накопление высокого количества антиоксидантов в соцветиях разных представителей рода *Coreopsis*, вероятнее всего, обусловлено накоплением максимальных сумм активных температур воздуха. Отметим, что для накопления изучаемых каротиноидов предпочтительны засушливые условия с достаточно высокими температурами.

Следует отметить, ранними исследованиями было подтверждено, что между температурным режимом и физиолого-биохимическими механизмами существует связь, отвечающая за накопление антиоксидантов [18]. Также было показано, что кроме температурно-влажностного режима и количества осадков, на уровень синтеза антиоксидантов влияет интенсивность солнечного света [17; 23].

Заключение

Таким образом, на основе проведенного анализа, перспективными представителями рода *Coreopsis* являются: *C. grandiflora*, *C. basalis*, *C. lanceolata*. Следует отметить, что в дальнейшем важно и целесообразно проводить более глубокое комплексное изучение урожайности соцветий, семенной продуктивности и других хозяйствственно-ценных агротехнических, некоторых фармакологических показателей выше представленных видов. С последующей возможностью предоставления рекомендаций относительно применения растительного сырья в фармацевтической индустрии.

Литература

1. А.с. 276291 СССР, МПК СО 9В 61/00. Способ получения пищевого красителя из сырья растительного происхождения – кореопсиса крупноцветкового / И.В. Касперская, Ю.А. Лукс (СССР). № 1123916/28-13; Заявлено 06.01.67; опубл. 14.07.70; Бюл. № 23. 2 с.
2. Афанасьева П.В., Куркин В.А., Куркина А.В. Оптимизация подходов к стандартизации фитопрепаратов на основе календулы лекарственной // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т.17. №5(3). С. 930-934. E-Labrary: 26371109.
3. Букин В.П., Букин А.В., Букина-Хрунык А.В. Научные основы интродукции красильных растений Юга Украины. К.: ПП «РК Мастер-принт», 2008. С. 226.
4. Брин В.Б. Нормальная физиология: учебник. 3-е изд., испр. и доп. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2016. 688 с.

5. Гавриченко Ю.Ю., Сафонюк С.Л., Кацев А.М., Шевчук О.М., Логвиненко Л.А., Феськов С.А. Скрининг антимикробной активности водных и спиртовых извлечений из растительного сырья с использованием биолюминесцентных бактерий // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2022. № 1. С. 60-69. E-Labrary ID: 48548437.
6. Гавриченко Ю.Ю., Шевчук О.М., Кацев А.М. Биотестирование водных и водно-спиртовых извлечений *Coreopsis grandiflora* Hogg. ex. Sweet. с использованием светящихся бактерий // IV Межвузовская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 100-летию Самарского государственного медицинского университета. Сборник материалов (Самара, 28 октября 2019 года). Самара, 2019. С. 68-72.
7. Дайнека В.И., Гостищев И.А., Третьяков М.Ю., Индина И.В. Каротиноиды лепестков цветков календулы // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2011. Т. 15/2. № 9 (104). С. 279-287. E-Library ID: 21315709; EDN: RYLTDР
8. Исаенок Т.Н. Малораспространенные цветочные многолетники, их использование в культуре // Сельскохозяйственный журнал. 2020. Вып. 3. № 13. С. 29-35.
9. Матвеев В.А. Статистика. Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. 2015. 84 с.
10. Кабанов А.В. Интродукция поздно цветущих декоративных травянистых многолетников в Главном ботаническом саду РАН // Мат. XVIII Международной научно-практической конференции «Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии». 2019. С. 589-593. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2019124>.
11. Кельчевская Л.С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Л.: Гидрометеоиздат. 1971. 216 с.
12. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР // Бюллентень ГБС АН СССР. 1979. Вып. 113. С. 3.
13. Нигматянова С.Э. Оценка декоративных многолетних интродуцентов в условиях Южного Приуралья // Субтропическое и декоративное садоводство. 2019. № 69. С. 58-63. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2019-69-58-63>.
14. Рихтер А.А. Использование в селекции взаимосвязей биохимических признаков // Сборник научных трудов ГНБС. 1999. Т. 108. С. 121-129. e-LIBRARY ID: 37335593.
15. Плешков Б.П. Практикум по биохимии растений. М.: Колос, 1985. 241 с.
16. Ушанова В.М., Воронин В.М., Репях С.М. Исследование влияния компонентов лекарственного растительного сырья на состав получаемых экстрактов // Химия растительного сырья. 2001. №3. С. 105-110. E-Library ID: 9337170; EDN: HWILVF.
17. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения // «Известия вузов. Лесной журнал». 2023. № 4. С. 58-75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-58-75>.
18. Ткачева Е.Н. Особенности накопления биологически активных веществ с антиоксидантной активностью представителями семейства яснотковые (Lamiaceae). Автореф. дисс. канд. сельхоз. наук. Специальность: 03.01.05 – Физиология и биохимия растений. М., 2021. 23 с.
19. Терлецкая В.А., Лукашов Р.И Зависимость содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях и цветках *Taraxacum officinale* от периода заготовки // Современные технологии в медицинском образовании: междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 2021). С. 2082-2084. <https://doi.org/10.7868/S0015330313050072>.
20. Ходаков Г.В. Желтый пищевой краситель из соцветий растений рода *Coreopsis* L. // Растительные ресурсы. 2000. Т. 36. Вып.1. С. 86-90.

21. Хлыпенко Л.А., Логвиненко Л.А., Марко Н.В., Работягов В.Д. Генофондовая коллекция эфиромасличных, лекарственных и пряно-ароматических растений Никитского ботанического сада (на 01.12.2014 г.) // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартыян». 2015. Вып. 16. С. 268-276.
22. Чичканова Е.С., Шевчук О.М., Кравченко Е.Н., Пищенко Е.А. Морфология и качество семян видов рода *Coreopsis* L. коллекции Никитского ботанического сада // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. 2023. № 2 (167). С. 61-70. <https://doi.org/10.25684/2712-7788-2023-2-167-62-71>.
23. Шапчиц М.П. Биохимия лекарственных растений: электронный учебно-методический комплекс с креативным компонентом для специальности 6-05-0511-02 «Биохимия». Минск: БГУ, 2025. 207 с. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/327690>.
24. Фомина Т.И. Ритмологические особенности видов весенне-летне-осенне-зеленого феноритмотипа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 11. № 85. С 64-67. E-Library ID: 25805930.
25. Abdurehman D., Guoruoluo Y., Li J., Liu G.Y., Xin X.L., Aisa H.A. Chemical constituents of *Coreopsis tinctoria* // Chemistry of natural compounds. 2022. Vol. 58. № 4. P. 741-745. <https://doi.org/10.1007/s10600-022-03782-y>.
26. Jiang H., Li Zh., Jiang X., Qin Y. Comparison of metabolome and transcriptome of flavonoid biosynthesis in two colors of *Coreopsis tinctoria* Nutt. // Frontiers in plant science. 2022. Vol. 13. P. 1-13. Article: 810422. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.810422>.
27. Shen J., Jiang B., He C., Xiao P., Hu M., Tan W., Ding J., Xu L., Hamulati H., Sun Y. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and toxicology of *Coreopsis tinctoria* Nutt.: a review // Journal of ethnopharmacology. 2021. Vol. 269. P. 113690. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113690>.

References

1. А.с. 276291 USSR, MPK SO 9B 61/00. Способ получения пышевого красителя из сырья растительного происхождения – кореопсиса крупнокветкового / И.В. Касперская, Ю.А. Лука (СССР). № 1123916/28-13; Заявлено 06.01.67; опубл. 14.07.70; Byul. 23. 2 п. (In Russ.)
2. Afanasyeva, P.V., Kurkin, V.A., & Kurkina, A.V. (2015). Optimizaciya podxodov k standartizacii fitopreparatov na osnove kalenduly` lekarstvennoj. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 17.5(3):930-934. E-Labrary: 26371109. (In Russ.)
3. Bukin, V.P., Bukin, A.V., & Bukina-Khrunyk, A.V. (2008). Nauchny'e osnovy` introdukcii krasil'ny'x rastenij Yuga Ukrayiny'. K.: PP «RK Master-print», 226. (In Russ.)
4. Brin, V.B. (2016). Normal'naya fiziologiya: uchebnik. 3-e izd., ispr. i dop. Moskva: GE`OTAR-Media. 688 s. (In Russ.)
5. Gavrichenko, Yu.Yu., Safronyuk, S.L., Kacev, A.M., Shevchuk, O.M., Logvinenko, L.A., & Fes'kov, S.A. (2022). Skrining antimikrobnoj aktivnosti vodny'x i spirtovy'x izvlechenij iz rastitel'nogo sy`r`ya s ispol'zovaniem biolyuminescentny'x bakterij. *Vestnik VGU. Seriya: Ximiya. Biologiya. Farmaciya*. 1:60-69. E-Labrary ID: 48548437 (In Russ.)
6. Gavrichenko, Yu.Yu., Shevchuk, O.M., & Katsev, A.M. (2019). Biotestirovanie vodny'x i vodno-spirtovy'x izvlechenij *Coreopsis grandiflora* Hogg. ex. Sweet. s ispol'zovaniem svetyashhixya bakterij. IV Mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennaya 100-letiyu Samarskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta. Sbornik materialov (Samara, 28 oktyabrya 2019 goda). 68-72. (In Russ.)

7. Daineka, V.I., Gostishchev, I.A., Tretyakov, M.Yu., & Indina, I.V. (2011). Karotinoidy` lepestkov czvetkov kalenduly`. *Nauchny'e vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenny'e nauki*, 15/2, no. 9 (104):279-287. E-Library ID: 21315709. (In Russ.)
8. Isaenko, T.N. (2020). Malorasprostranenny'e czvetochny'e mnogoletniki, ix ispol'zovanie v kul'ture. *Sel'skoxozyajstvennyj zhurnal*. 3(13):29–35. (In Russ.)
9. Matveev, V.A. (2015). Statistika. Uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet. 84 p. (In Russ.)
10. Kabanov, A.V. (2019). Introdukciya pozdno czvetushhix dekorativny'x travyanisty'x mnogoletnikov v Glavnom botanicheskem sadu RAN. *Mat. XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy` botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongoli»*, 589-593. (In Russ.)
11. Kelchevskaya, L.S. (1971). Metody` obrabotki nablyudenij v agroklimatologii. L.: Gidrometeoizdat. 216. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2019124>. (In Russ.)
12. Metodika fenologicheskix nablyudenij v botanicheskix sadax SSSR (1979). *Byulleten` GBS AN SSSR*, 113:3. (In Russ.)
13. Nigmatyanova, S.E. (2019). Ocenna dekorativny'x mnogoletnix introducentov v usloviyah Yuzhnogo Priural`ya. *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo*, 69:58-63. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2019-69-58-63>. (In Russ.)
14. Richter, A.A. (1999). Ispol`zovanie v selekcii vzaimosvyazej bioximicheskix priznakov. *Sbornik nauchny'x trudov GNBS*, (108):121-129. e-LIBRARY ID: 37335593. (In Russ.)
15. Pleshkov, B.P. (1985). Praktikum po bioximii rastenij. M.: Kolos, 241. (In Russ.)
16. Ushanova, V.M., Voronin, V.M., & Repyakh, S.M. (2001). Issledovanie vliyanija komponentov lekarstvennogo rastitel'nogo sy'r'ya na sostav poluchaemy'x e`kstraktov. *Ximiya rastitel'nogo sy'r'ya*, 3:105-110. E-Library ID: 9337170. (In Russ.)
17. Tarhanov, S.N., Pinaevskaya, E.A., Aganova, Yu.E., & Paxov, A.S. (2023). Izmenchivost` bioximicheskix priznakov Pinus sylvestris (Pinaceae) pri adaptacii form v usloviyah izby`tochnogo uvlazhneniya. *«Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal»*, 4:58-75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-58-75>. (In Russ.)
18. Tkacheva, E.N. (2021). Osobennosti nakopleniya biologicheski aktivny'x veshhestv s antioksidantnoj aktivnostyu predstaviteleyami semejstva yasnotkovy'e (Lamiaceae). Avtoref. diss. kand. sel`xoz. nauk. Special`nost': 03.01.05 – Fiziologiya i bioximiya rastenij. Moscow. 23 p. (In Russ.)
19. Terletskaya, V.A., & Lukashov, R.I. (2021). Zavisimost` soderzhaniya xlorofilov i karotinoidov v list`yax i czvetkax *Taraxacum officinale* ot perioda zagotovki. *Sovremenny'e texnologii v medicinskom obrazovanii: mezhdunar. nauch. -prakt. konf.* Minsk. 2082-2084. <https://doi.org/10.7868/S0015330313050072>. (In Russ.)
20. Khodakov, G.V. (2000). Zheltyj pishchevoj krasitel` iz soczvetij rastenij roda *Coreopsis* L. *Rastitel'ny'e resursy*, 36(1):86-90. (In Russ.)
21. Khlypenko, L.A., Logvinenko, L.A., Marko, N.V., & Rabotyagov, V.D. (2015). Genofondovaya kollektiya e`firomaslichny'x, lekarstvenny'x i pryano-aromaticheskix rastenij Nikitskogo botanicheskogo sada (na 01.12.2014 g.). *Nauchny'e zapiski prirodnogo zapovednika «My's Mart'yan»*, 16:268-276. (In Russ.)
22. Chichkanova, E.S., Shevchuk, O.M., Kravchenko, E.N., & Pishchenko, E.A. (2023). Morfologiya i kachestvo semyan vidov roda *Coreopsis* L. kollekcii Nikitskogo botanicheskogo sada. *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*, 2(167):61-70. <https://doi.org/10.25684/2712-7788-2023-2-167-62-71>. (in Russ.)

23. Shapchicz, M.P. (2025). Bioximiya lekarstvennyx rastenij: elektronnyj uchebno-metodicheskij kompleks c kreativnym komponentom dlya specjalnosti 6-05-0511-02 «Bioximiya». Minsk: BGU. 207 s. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/327690>. (In Russ.)
24. Fomina, T.I. (2011). Ritmologicheskie osobennosti vidov vesenne-letne-osenne-zelenogo fenoritmotipa. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 11(85):64-67. E-library ID: 25805930 (In Russ.)
25. Abdurehman, D., Guoruoluo, Y., Li, J., Liu, G.Y., Xin, X.L., & Aisa, H.A. (2022). Chemical constituents of *Coreopsis tinctoria*. Chemistry of natural compounds. 58(4):741-745. <https://doi.org/10.1007/s10600-022-03782-y>. (In Engl.)
26. Jiang, H., Li, Zh., Jiang, X., & Qin Y. (2022). Comparison of metabolome and transcriptome of flavonoid biosynthesis in two colors of *Coreopsis tinctoria* Nutt. *Frontiers in plant science*. 13:1-13. Article: 810422. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.810422>. (In Engl.)
27. Shen, J., Jiang, B., He, C., Xiao, P., Hu, M., Tan, W., Ding, J., Xu, L., Hamulati, H., & Sun, Y. (2021). Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and toxicology of *Coreopsis tinctoria* Nutt.: a review. *Journal of ethnopharmacology*, 269:113690. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113690>. (In Engl.)

дата поступления: 20.05.2025

дата принятия: 28.11.2025

© Чичканова Е.С., Гребенникова О.А., 2025

ЭКОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ / ANIMAL ECOLOGY

УДК 575.174.5

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/06>

M.I. Bitner, N.V. Smolina, Y.A. Utkin

SEXUAL DIMORPHISM AND GENETIC DIVERSITY OF THE *CARASSIUS CARASSIUS* POPULATION IN THE EUTROPHIC WATER BODY OF THE TURA RIVER BASIN

Битнер М.И., Смолина Н.В., Уткин Я.А.

ПОЛОВОЙ ДИМОРФИЗМ И ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ПОПУЛЯЦИИ *CARASSIUS CARASSIUS* В ЭВТРОФНОМ ВОДОЕМЕ БАССЕЙНА РЕКИ ТУРА

Abstract. The study aimed to identify sexual differences and genetic diversity of the crucian carp *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758) inhabiting a eutrophic reservoir of the Tura river basin (Western Siberia). This species has been dynamically declining in numbers in Eurasian waters in recent decades [5; 15; 16; 19]. During the study, a biological analysis of 100 individuals of the crucian carp was conducted, including the determination of morphometric characteristics and the area of erythrocyte nuclei. The study showed that this population is characterized by a short dwarf form with a sex ratio of 1: 1, where all individuals in the sample had the fourth stage of gonadal maturity. Reliable sex differences in size-weight and meristic traits were revealed. Females were distinguished by a greater commercial length and body weight, and also had reliably higher values for 55.6% of the studied meristic traits. Analysis of the erythrocyte nuclear area showed that all individuals were diploids, while sex differences in this indicator were not significant. Genetic analysis of mtDNA revealed a single CCA2 haplotype, which indicates low genetic diversity of this population. The results of the study emphasize the need to monitor changes in the population structure of golden crucian carp and develop measures to preserve this species.

Key words: golden crucian carp; haplotype; population structure; eutrophic reservoir.

About the authors: Maria I. Bitner, ORCID: 0000-0002-6942-5838, junior research fellow, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, m.i.sid@yandex.ru; Natalia V. Smolina, ORCID: 0000-0002-8066-9294, Candidate of Biological Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia, natan11@mail.ru; Yaroslav A. Utkin, ORCID:

Аннотация. Исследование направлено на выявление половых различий и генетического разнообразия золотого карася *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758), обитающего в эвтрофном водоеме бассейна реки Тура (Западная Сибирь). Данный вид в последние десятилетия динамично снижает численность в водоемах Евразии [5; 15; 16; 19]. В ходе работы проведен биологический анализ 100 особей золотого карася, включая определение морфометрических характеристик и площади ядер эритроцитов. Исследование показало, что данная популяция характеризуется низкотелой карликовой формой с соотношением полов 1:1, где все особи в выборке имели четвертую стадию зрелости гонад. Выявлены достоверные половые различия по размерно-весовым и меристическим признакам. Самки отличались большей длиной и массой тела, а также имели достоверно большие значения по 55,6% из исследованных меристических признаков. Анализ площади ядер эритроцитов показал, что все особи являются диплоидами, при этом половые различия по этому показателю оказались не значимыми. Генетический анализ mtДНК выявил единственный гаплотип CCA2, что указывает на низкое генетическое разнообразие в данной популяции. Результаты исследования подчеркивают необходимость мониторинга за изменениями в структуре популяций золотого карася и разработки мероприятий по сохранению данного вида.

Ключевые слова: золотой карась; гаплотип; структура популяции; эвтрофный водоем.

Сведения об авторах: Битнер Мария Ивановна, ORCID: 0000-0002-6942-5838, младший научный сотрудник, Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, m.i.sid@yandex.ru; Смолина Наталья Васильевна, ORCID: 0000-0002-8066-9294, канд. биол. наук, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия, natan11@mail.ru; Уткин Ярослав Александрович, ORCID: 0009-0008-7204-0665, млад.



0009-0008-7204-0665, junior research fellow, науч. сотр., Институт молекулярной и клеточной Institute of Molecular and Cellular Biology SB биологии Сибирского отделения РАН, г. RAS, Novosibirsk, Russia, Новосибирск, Россия, utkin.jaroslav@mcb.nsc.ru. utkin.jaroslav@mcb.nsc.ru

Bitner M.I., Smolina N.V., Utkin Y.A. Sexual dimorphism and genetic diversity of the *Carassius carassius* population in the eutrophic water body of the Tura basin // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 70-83. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/06>

Bitner, M.I., Smolina, N.V., & Utkin, Y.A. (2025). Sexual Dimorphism and Genetic Diversity of the *Carassius carassius* Population in the Eutrophic Water Body of the Tura Basin. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 70-83. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/06>

Introduction

In the waterbodies of Northern Eurasia, the crucian carp (*Carassius carassius* L.) has historically been relatively abundant [1; 4; 8; 10; 15; 19].

The crucian carp is one of the most ecologically adaptable native fish species, resistant to various adverse environmental factors such as oxygen deficiency, extreme temperatures, and poor feeding conditions.

Under such circumstances, this species often forms a low-bodied dwarf form – *C. carassius* *morpha humilis* Heckel, 1840, which demonstrates a wide range of variability in several of its biological and morphological traits [4; 7; 12].

Since the late 20th century, in most waterbodies of Eurasia, as well as in lakes of the steppe and forest-steppe zones and in floodplain taiga reservoirs of Western Siberia, a disappearance or a rapid decline in the abundance of *C. carassius* has been observed [3; 6; 8; 9; 16; 17; 19].

Possible reasons for the reduction of its range include displacement due to the introduction of the silver crucian carp from the Amur river [3; 6; 8; 15; 16; 19; 23; 26], which has a higher growth rate [30]; a potential hybridization among cyprinid species [3; 6; 8; 15; 16; 19; 22]; and a low genetic diversity of the crucian carp, suggesting a reduced ability to adapt to changing environmental conditions [16; 23; 26; 27]. These factors determine growing scientific interest in the current state and biological characteristics of the crucian carp populations, both in Russia and abroad [15; 16; 19; 22; 23; 26; 31; 32].

Previously, sexual dimorphism in the crucian carp populations outside the breeding season was characterized as weak. For example, in the waterbodies of Kazakhstan, females and males differed only in the size of the pectoral and anal fins [8]. No sexual dimorphism was found in populations of the crucian carp in some waterbodies of the Udmurt Republic [12]. In the Middle Ob river basin, differences were recorded only in head length and maximum body height [3; 5; 8].

As a result of studies on the crucian carp population in Lake Igumenskoye (Tomsk), sexual dimorphism was revealed only in plastic (morphometric) traits: females had greater head length, anteventral, and antepectoral distances; males had larger ventroanal, ventercaudal, anocaudal, dorsocaudal distances, head height, eye diameter, dorsal and anal fin heights, and the lengths of pectoral, pelvic, and lower caudal fin lobes [19].

A comparative analysis of how often certain countable morphological traits (meristic traits) appear is used to identify intra-population and sex-related features in bony fishes. This approach

is based on the fact that these traits have high heritability and show up early in ontogenesis [13]. However, studies focused on sexual differences in meristic traits that include the three sections of the vertebral column and the number of seismosensory canals on paired cranial bones are still insufficient for populations of the crucian carp.

It is known that *C. carassius* forms bisexual populations with a 1:1 female-to-male ratio, and individuals have a diploid ($2n$) set of chromosomes [3; 4; 5; 8; 16]. Research on the genetic diversity of the genus *Carassius* based on mitochondrial DNA (mtDNA) has shown that the crucian carp has at least two closely related haplotypes (CCA1 and CCA2). One of them was originally identified in the Czech Republic, and the other in Kazakhstan [26; 27]. It is also known that a comparative mtDNA analysis of the crucian carp and the silver crucian carp revealed a difference of about 6% in nucleotide substitutions, which support the relatedness of the two species [3]. Until now, mtDNA of the crucian carp from the study region has not been analysed.

The aim of this work is to examine sexual differences and genetic diversity in a population of the crucian carp inhabiting a eutrophic waterbody within the Tura river basin.

Materials and Methods

For this study, we selected a winterkill-prone body of water, Lake Srednee (coordinates: $57^{\circ}38'15.9''N$, $64^{\circ}28'50.9''E$), which belongs to the Tura river basin (Western Siberia) and is not connected to the main river channel. Lake Srednee is a small, roughly circular lake. Its shoreline is mostly surrounded by a mixed forest, while the western part is swampy. The lake's surface area is 1.07 km^2 , and the depth to the silty bottom is between 1.1 m and 1.6 m.

The fish community of the lake includes the following species: *C. carassius*, *Carassius gibelio* (Bloch, 1782), *Rhynchocypris percnurus* (Pallas, 1814), and *Percottus glenii* Dybowski, 1877. During the study period, the lake showed an increased level of primary production throughout its area. The following species of higher aquatic plants were common: *Typha latifolia* L. (1753), *Nuphar lutea* (L.) Smith., *Lemna minor* L. (1753), and *Potamogeton natans* L. (1753). There was also an intensive growth of the cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae*.

Sampling was carried out in July 2018. Fish were collected with a fishing seine (20.0 m long, 1.5 m high, 24-mm mesh size) and with telescopic rods equipped with two-hook rigs.

According to its hydrochemical characteristics during sampling, the water of Lake Srednee was classified as belonging to a hydrocarbonate class, a sodium group, and a low-mineralised type (type I) [6]. During the research period, the concentrations of ammonium nitrogen and total iron exceeded the maximum allowable limits. The increased amount of organic matter and high primary production during the summer growing season match the conditions typical of a eutrophic waterbody prone to winterkill.

The research object was the population of the crucian carp, historically long-established in this particular waterbody. The total sample size comprised 100 specimens. For all individuals, a biological analysis was conducted to determine: sex and age; gonadal maturity stages; commercial length measurements (L, cm) – from the tip of the snout to the base of the caudal fin, measured horizontally; maximum body height (qh) – from the highest dorsal point to the ventral side, measured vertically; total body mass (m, g); cytometric analysis of the erythrocyte nuclear area (ENA); and scoring of meristic traits considering bilateral distribution according to established

ichthyological guidelines [12; 15; 18]. For 30 individuals (15 females and 15 males) selected from the total sample, a sequence analysis of the mitochondrial DNA control region (460 bp) was performed to investigate the genetic diversity of the population.

For all individuals in the sample, there were analyzed 18 meristic traits, including: the number of spiny rays in the dorsal fin (D_K); the number of branched rays in the dorsal fin (D_B); spiny rays in the anal fin (A_K); branched rays in the anal fin (A_B); the number of gill rakers on the first gill arch (Sp.br.); perforated scales (l.l.); rays in the pectoral fin (P_B); rays in the pelvic fin (V_B); the total number of scales in the lateral line (l.l. total.); the number of scale rows above the lateral line (l.l. above) and below the lateral line (l.l. under); total vertebrae number in the vertebral column (Vo); vertebrae count in the abdominal region (Va), transitional region (Vi), and caudal region including urostyle (Vc + ct); as well as the number of sensory canal pores (CCK) located on three paired cranial bones – praaeperculum (pop), dentale (dn), and frontale (f) [12; 16; 18; 20].

To measure the erythrocyte nuclear area (ENA), arterial blood samples were taken from live specimens, followed by fixation and staining of erythrocyte nuclei using a fixative-stain solution composed of 0.3% dry eosin methylene blue dye according to May-Grünwald in methanol. Cytogenetic analysis was performed microscopically, and cytological measurements of erythrocyte nuclei were conducted using the licensed version of the Levenhuk Lite software. The erythrocyte nuclear area was calculated using the formula for the area of an ellipse, based on measurements of erythrocyte length and width [2; 6]. To ensure statistical reliability of the ENA determination, 20 randomly selected erythrocytes were measured per individual.

Statistical processing included the calculation of the mean value (Xmean), the standard error of the mean (mX), and the coefficient of variation (CV) [14].

The normality of the distribution of traits was tested using the Kolmogorov–Smirnov test. Since the indicators of body length, height, body mass, and meristic traits deviated from a normal distribution, the Mann–Whitney U-test was used to compare the mean values. The GSI in the sample followed a normal distribution; therefore, the Student's t-test was applied to compare females and males for this parameter [14]. Statistical analysis was performed using Microsoft Excel 2016.

Fin clips of the fish, preserved in 80% ethanol, served as the biological material for the genetic analysis. DNA extraction was performed using the D-cells kit according to the manufacturer's protocol. A fragment of the mtDNA control region (D-loop) was amplified using the “BioMaster HS-Taq PCR-Color” kit (Biolabmix) with primers L15923 (5'-TTAAAGCATCGGTCTTGTAA-3') and H16150 (5'-GCCCTGAAATAGGAACCAGA-3'), following the methodology of Takada et al., 2010 [29]. PCR products were purified from the reaction mixture using ExoSAP-IT reagent (Applied Biosystems). Sequencing reactions were carried out in a thermal cycler using BigDye™ Terminator v1.1 reagents (Applied Biosystems) with the following thermal profile: initial denaturation (1 cycle) – 96°C (4 min); 40 cycles (denaturation – 98°C (10 s), primer annealing – 57°C (10 s), extension – 60°C (4 min)); deactivation – 96°C (3 min); hold – 4°C (indefinite). Reaction products were purified using the BigDye XTerminator Purification Kit (Thermo Fisher Scientific). The sequencing of the purified DNA mixture was performed using a 3500 Genetic Analyzer (Applied Biosystems) capillary sequencer. The alignment of the nucleotide sequences of the mtDNA control region fragment (460

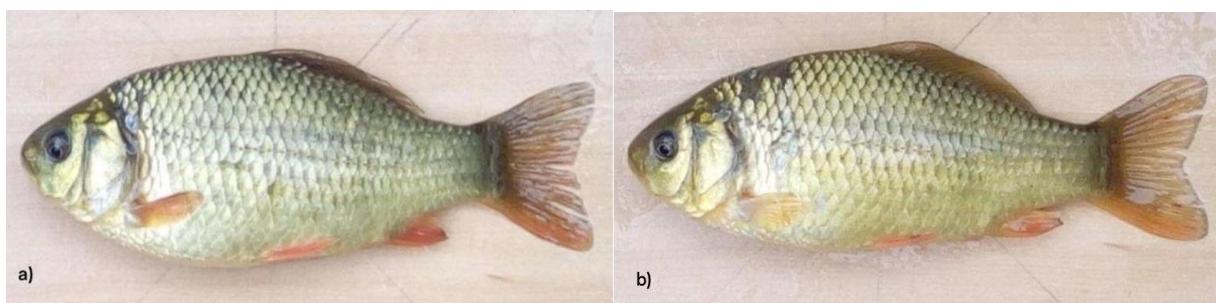
bp) of the crucian carp was performed using the MAFFT v7.245 algorithm in the Geneious v10.0.9 software. The obtained sequences were compared with the publicly available GenBank database.

Alignment of nucleotide sequences of the mitochondrial control-region fragment of the golden crucian carp was performed using the MAFFT v7.245 algorithm [24]. To confirm species identity, phylogenetic relationships of the obtained sequences with sequences of the golden and silver crucian carp from the GenBank database [21] were reconstructed using the maximum-likelihood method in RAxML v8.0 [28]. The outgroup comprised the closely related species of the Japanese silver crucian carp (*Carassius cuvieri* Temminck & Schlegel, 1846) (mtDNA: AP011237.1). The phylogenetic tree visualization was performed using the iTOL version 6 online tool [25].

The study was conducted in accordance with all applicable international, national and institutional guidelines for the care and use of animals.

Results and Discussion

The studied sample of *C. carassius* (100 spec.) consisted of 52 females and 48 males (a ratio close to 1:1). All specimens were captured at Stage IV gonadal development. The size of the individuals in the sample ranged in length from 10.1 cm to 15.2 cm and in weight from 22 g to 84 g. The body was elongated, with a mean body length-to-depth ratio of 3.1. The lateral line is perforated. The number of perforated scales in the lateral line varied from 10 to 33 in females and from 17 to 31 in males. The total number of scales along the lateral line ranged from 31 to 40 for females and from 33 to 38 for males. The lower jaw was upturned. The captured individuals had a dark spot at the base of the caudal fin (Fig. 1). These characteristics correspond to the description of the shallow-bodied dwarf form *C. carassius* morpha *humilis* Heckel, 1840, inhabiting small oxygen-depleted waterbodies [7; 12].



**Fig. 1. *Carassius carassius* specimens from Lake Srednee,
a) female (l = 10.5 cm, m = 38 g); b) male (l = 11.9 cm, m = 42 g)**

The age of the specimens in the sample was represented by four groups, from 5+ to 8+ years (Table 1). Younger age groups were not captured during the sampling period. The largest number of individuals (49 spec.) were 7+ years.

Table 1

**Size-age Characteristics of Female and Male Crucian Carp
in the Sample from the Studied Waterbody**

Sex, quantity	Age, year							
	5+		6+		7+		8+	
	L mean, cm	m mean, g						
Females, 52 spec.	10.9	28.0	12.3	43.9	13.6	63.1	14.1	68.1
Males, 48 spec.	11.0	29.3	11.3	32.1	11.6	33.6	11.6	34.2
All individuals	11.0	28.8	11.8	37.4	12.6	49.2	13.1	54.3

Note. L_{mean} – mean length; m_{mean} – mean mass.

Females in the entire sample were significantly larger in body length, depth and mass (Table 1 and Table 2). The differences in body depth and mass of the individuals are likely associated with the high (fourth) stage of gonad maturity, the size of which in females is usually 1–2 times larger during egg maturation [1; 4; 7].

Table 2

**Comparison of Morphological Traits between Female and Male Crucian Carp
in the Studied Sample**

Traits	Entire Sample (100 spec.)				Same-Age Individuals (49 spec.)				pT _U	
	Females (52 spec.)		Males (48 spec.)		Females 7+ (27 spec.)		Males 7+ (22 spec.)			
	̄X± mx	CV	̄X± mx	CV	̄X± mx	CV	̄X± mx	CV		
L, cm	13.5±0.2	4.2	11.4±0.1	9.1	0.000***	13.6±0.2	8.1	11.3±0.1	4.2	0.000***
qh, cm	4.4±0.1	10.9	3.6±0.0	5.7	0.000***	4.5±0.1	10.5	3.6±0.0	5.0	0.000***
m, g	60.7±2.2	26.0	32.8±0.7	13.8	0.000***	63.1±2.8	22.8	32.1±0.9	13.1	0.000***
Sp.br.	27.3±0.2	6.0	27.0±0.3	6.9	0.101	27.3±0.2	3.9	26.7±0.4	6.4	0.001***
LLS	35.8±0.2	3.7	35.9±0.1	2.6	0.595	36.0±0.3	3.6	35.3±0.3	3.4	0.000***
LL	24.9±0.7	20.2	24.8±0.5	13.7	0.000***	25.2±0.9	17.7	24.6±0.5	10.3	0.000***
TRa	5.9±0.1	6.1	5.8±0.1	7.4	0.179	5.9±0.1	6.2	5.7±0.1	7.4	0.029*
TRb	5.9±0.0	4.5	6.0±0.1	5.4	0.301	6.0±0.0	3.2	5.9±0.1	5.0	0.004**
DSR	4.0±0.0	0.0	4.0±0.0	0.0	1.223	4.0±0.0	0.0	4.0±0.0	0.0	0.771
DBR	17.7±0.1	4.1	17.3±0.1	3.8	0.016*	17.6±0.1	4.2	17.4±0.1	3.8	0.017*
ASR	3.0±0.0	0.0	3.0±0.0	0.0	1.223	3.0±0.0	0.0	3.0±0.0	0.0	0.771
ABR	6.8±0.1	6.3	6.7±0.1	7.3	0.096	6.9±0.1	6.7	6.9±0.1	7.1	0.089
PR	14.8±0.1	6.7	14.6±0.1	5.3	0.036*	14.8±0.1	4.7	14.6±0.2	5.4	0.028*
VR	9.8±0.1	4.8	9.7±0.1	5.5	0.045*	9.8±0.1	5.2	9.7±0.1	5.4	0.003**
TV	33.9±0.1	2.4	33.8±0.2	3.2	0.032*	34.0±0.2	2.4	33.7±0.3	3.5	0.000***
PV	16.6±0.1	4.8	16.7±0.12	5.0	0.646	16.4±0.1	4.6	16.6±0.2	5.2	0.077
TRV	4.2±0.1	19.3	4.1±0.1	18.5	1.030	4.4±0.1	15.7	4.0±0.2	20.4	0.005**
CV+ ct	13.3±0.1	6.2	13.1±0.1	5.2	0.141	13.0±0.2	6.0	13.1±0.2	5.4	0.115
pop	9.2±0.1	10.1	8.8±0.1	13.3	0.035*	9.2±0.2	9.6	8.8±0.3	14.0	0.117
dn	5.8±0.1	8.1	5.8±0.1	9.8	0.310	5.8±0.1	6.8	5.6±0.1	8.7	0.095
f	6.9±0.1	10.4	6.8±0.1	12.2	0.299	6.9±0.1	9.7	7.1±0.1	9.0	0.209

Note. ̄X – mean value; mx – standard error of the mean; CV – Coefficient of Variation; pT_U – calculated value of the Mann-Whitney U test; * – differences are significant at the 1st level ($p \leq 0.05$); ** – differences are significant at the 2nd level ($p \leq 0.01$); *** – differences are significant at the 3rd level ($p \leq 0.001$).

Sexual dimorphism among all individuals in the sample of the crucian carp from the eutrophic water body was identified for 6 meristic characters (Table 2).

In the sample, females showed a statistically significantly higher number of perforated scales in the lateral line, a greater number of branched rays in the dorsal, pectoral, and pelvic fins, as well as a higher number of vertebrae in the axial skeleton. When comparing individuals of the same age, differences were also found in the above-mentioned meristic features, as well as in the total number of scales in the lateral line, the number of scales above and below the lateral line, and the number of transitional vertebrae. The mean values of all these traits were higher in females at various levels of statistical significance.

There is evidence of both positive and negative correlations between certain countable traits and body length in *C. carassius* [12]. For example, the number of transitional vertebrae (Vi) shows a significant positive correlation with body length (l) in crucian carp inhabiting the Udmurt Republic [12], which is consistent with acquired data indicating significantly greater body length and a higher number of transitional vertebrae (Vi) in females compared to males of the same age from Lake Srednee. In the cited study [12], a negative correlation was found between body length and the total number of rays in the dorsal fin (D), along with the absence of sexual differences for this trait. In this study, the number of rays in the dorsal fin was divided into two traits (Dk and Dv), and significant differences at the first level of significance ($p \leq 0.05$) were found between females and males in the number of branched rays in the dorsal fin, both in the overall sample and among same-age individuals (Table 2).

Regarding the number of seismosensory canals (SSC) on the preopercular bone, females also showed a statistically higher count in the overall sample. However, when comparing same-age eight-year-old individuals, no differences were recorded for this trait. It is known that the number of SSC is related to the number of primary canal neuromasts – mechanoreceptive organs located in the canals of dermal bones, which play an important role in detecting moving food objects and other elements in the aquatic environment, and depends on the concentration of various chemical elements [13]. Further research is recommended to investigate the relationship between SSC on paired skull bones and the hydrochemical characteristics of the water body, as well as the potential for assessing environmental comfort based on fluctuating asymmetry of these traits.

Thus, sexual dimorphism in meristic features among same-age crucian carp from the eutrophic waterbody of the Tura river basin was found to be statistically significant in 55.6% of the studied meristic features (10 out of 18), confirming the necessity of accounting for differences between males and females of the species in morphological examination.

The average erythrocyte nuclear area (ENA) in females across the entire sample was $45.9 \pm 0.4 \mu\text{m}^2$, while in males it was $46.3 \pm 0.5 \mu\text{m}^2$. The differences between females and males in this trait, both in the overall sample and among eight-year-old individuals, were not statistically significant (Table 3). However, the greatest variability in ENA parameters was recorded for males, covering the full range from minimum to maximum values ($37.0\text{--}54.0 \mu\text{m}^2$).

Table 3

**Comparison of Mean Dimensional Characteristics of ENA
for Female and Male Crucian Carp in the Sample**

Traits	All Females (52 spec.)					All Males (48 spec.)					Tst
	min	max	\bar{X}	$m_{\bar{X}}$	CV	min	max	\bar{X}	$m_{\bar{X}}$	CV	
ENA, μm^2	39.0	51.0	45.9	0.4	6.2	37.0	54.0	46.3	0.5	7.8	0.58
Females 7+ (27 spec.)					Males 7+ (22 spec.)						
ENA, μm^2	39.0	50.0	45.5	0.7	7.4	43.0	54.0	46.4	0.7	6.9	0.90

Note. min – minimum value; max – maximum value; \bar{X} – mean value; $m_{\bar{X}}$ – standard error of the mean; CV – Coefficient of Variation; Tst – calculated Student's t-test value.

The distribution of the erythrocyte nuclear area (ENA) by the quantity of individuals in the sample between females and males is presented in Figure 2.

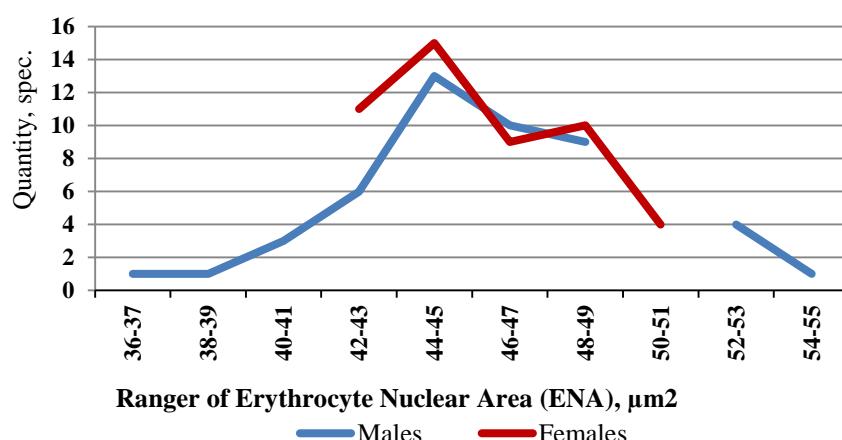


Fig. 2. Erythrocyte Nuclear Area Distribution in Female and Male Crucian Carp

The size range of the erythrocyte nuclear area (ENA) in female crucian carp (*Carassius carassius*) from Lake Srednee varied from 39.0 to 51.0 μm^2 , which was five intervals smaller than in males.

It is known that erythrocytes with an unusual size and nuclear structure can serve as a marker trait for hybrids (or allopolyploids) in cyprinid fish [2]. It has also been demonstrated that in cyprinid species, males can undergo hybridization more readily than females when co-habiting with other related species, such as the silver crucian carp (*Carassius gibelio*) [2; 3; 8; 16]. To gain a more detailed understanding of potential hybridization between the two crucian carp species in the studied waterbody, additional cytometric studies of nuclear anomalies (size, number of nucleoli, segmentation) are recommended [2].

The analysis of the genetic diversity in the crucian carp from Lake Srednee, based on a representative fragment of the mtDNA control region (460 bp), revealed that all 30 specimens shared an identical haplotype, CCA2. This indicates a low genetic diversity within the studied population [27].

To further examine the phylogenetic relationships with other species of the genus *Carassius*, we obtained all available sequences of the mtDNA control region for the crucian carp from the GenBank database and reconstructed a phylogenetic tree. All identified *C. carassius* sequences

formed a distinct cluster separate from *C. gibelio* and *C. cuvieri*. This cluster splits into two clades corresponding to two different haplotypes, CCA1 and CCA2, as was previously shown by Sakai et al. [27]. The phylogenetic tree of the genus *Carassius* is presented in Figure 3, where the numbers at the branches (1; 0.814; 0.802) represent the bootstrap support values.

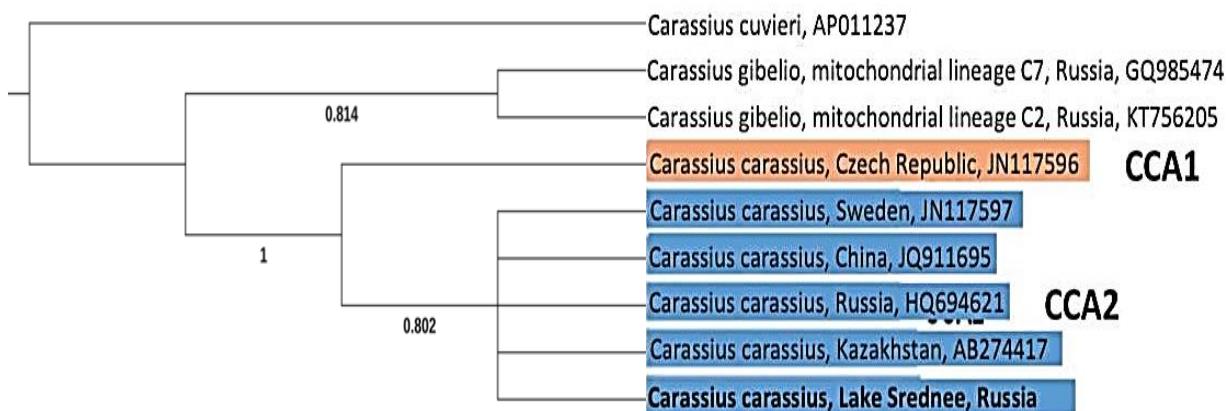


Fig. 3. Phylogenetic relationship of the crucian carp with other species of the genus *Carassius*, where two haplotypes are highlighted in color: red – CCA1, blue – CCA2

The sequences of the crucian carp from Lake Srednee obtained in this study show 100% sequence identity with AB274417 (Kazakhstan), JN117597 (Sweden), HQ694621 (Russia), and JQ911695 (China). These results indicate that the individuals from our sample belong genetically to the *Carassius carassius* species and correspond to the widely distributed Eurasian haplotype CCA2.

The detection of only two haplotypes of the crucian carp across the entire Eurasian range indicates a low genetic diversity, likely resulting from an ongoing population decline [15, 16, 22, 23, 26, 27, 30-32]. These findings underscore the need for continued monitoring of the population structure and provide a solid foundation for developing some targeted conservation measures.

Conclusion

The study of the crucian carp population in the eutrophic waterbody of the Tura river basin revealed distinctive features in both morphological and genetic structure. The population consisted of a small-bodied dwarf form (*C. carassius* morpha *humilis* Heckel, 1840) with a sex ratio approaching 1:1, consistent with previously published data and indicating stability in reproductive processes.

Pronounced sexual dimorphism in morphometric and meristic traits was observed, emphasizing the importance of further investigation into these characteristics to enhance understanding of the species' ecology.

A low genetic diversity, evidenced by the lack of mtDNA haplotype variation and the uniformity of erythrocyte nuclear area in both sexes, raises concerns regarding the population vulnerability. This highlights the need for ongoing monitoring and additional studies. Taking these findings into account, developing and implementing some conservation and population restoration measures are important steps toward ensuring the long-term survival of the species in its natural habitats.

Regular monitoring of the population and the habitat hydrochemical parameters is recommended to allow prompt adjustments to conservation strategies and to maintain the species' genetic integrity over time.

The study was funded by the Ugra Foundation for Scientific and Technological Progress, as part of scientific project No. 2025-604-04.

References

1. Annotated catalog of roundworms and fishes of the continental waters of Russia (1998). Moscow: Nauka. 220. (in Russ.).
2. Apalikova O.V. (2008). Phylogenetic analysis of two forms of silver carp *Carassius auratus gibelio* Bloch based on mitochondrial DNA variability. *Abstract of Cand. Sci. (Biol.)*. Vladivostok, 24. (in Russ.).
3. Apalikova, O.V., Podlesnykh, A.V., & Kukhlevsky, A.D., et al. (2011). Phylogenetic relationships of silver crucian carp *Carassius auratus gibelio* and *C. auratus cuvieri*, golden crucian carp *C. carassius* and common carp *Cyprinus carpio* based on mitochondrial DNA variability. *Genetics*, 47(3), 368-378. (in Russ.).
4. Atlas of freshwater fishes of Russia: in 2 volumes (2003). Edited by Yu. S. Reshetnikov. Moscow: Nauka, 1, 379. (in Russ.).
5. Bakina, A.V., & Yankova, N.V. (2017). Long-term dynamics of size-weight and morphophysiological indicators of goldfish of Lake Andreevskoye. *Bulletin of the State Agrarian University of the Northern Trans-Urals*, 1(36), 6-10. (in Russ.).
6. Bitner, M.I., & Smolina, N.V. (2023). Some cytogenetic features of populations of *Carassius gibelio* and *Carassius carassius* inhabiting hydrologically diverse waterbodies of the Tura River basin. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 63(3), 47-57. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/23-3/04> (in Russ.).
7. Berg L. S. (1949). Freshwater fishes of the USSR and adjacent countries: in 3 parts. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 2, 467-926. (in Russ.).
8. Goryunova, A.I., Isbekov, K. B., Asylbekova, S. Zh., Danko, E. K. (2017). On crucians of periodically drying steppe lakes of Northern Kazakhstan in the light of modern domestic and foreign studies. *Commercial species and their biology. Proceedings of VNIRO*, 165, 27-44. (in Russ.).
9. Zhuravlev, V.B. (2003). *Fishes of the Upper Ob basin*. Barnaul: Altai University, 291. (in Russ.).
10. Interesova, E.A., Rostovtsev, A.A., Suslyakov, V.V., Blokhin, A.N., Bogomolova, I.N., & Lyalina, M.I. (2020). Spatial organization of the fish population of reservoirs of the southern taiga of Western Siberia (within the Tomsk region). *Ecology*, 2, 125-133. <https://doi.org/10.31857/S0367059720020031>. (in Russ.).
11. Kafanova, V.V. (1984). Methods for determining the age and growth of fish. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 53. (in Russ.).
12. Kotegov, B.G. (2017). Variability of counting characteristics of the golden carp – *Carassius carassius* (L.) (Cyprinidae, Actinopterygii) from small ponds with different levels of anthropogenic pollution. *Volga Region Ecological Journal*, 1, 46 – 53. <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2017-1-46-53> (in Russ.).

13. Kotegov, B.G. (2024). Patterns of variability of discrete features of the seismosensory system of the head in freshwater fish in heterogeneous hydrochemical conditions. *Abstract of PhD thesis*. Astrakhan, 46 p. (in Russ.).
14. Lakin, G.F. (1990). *Biometrics*. Moscow: Higher School. 352. (in Russ.).
15. Monakhov, S.P., Askeev, A.O., Askeev, I.V., Shaimuratova, D.N., Askeev, O.V., & Smirnov, A.A. (2020). Past and present of species of the genus *Carassius* of the Middle Volga region. *Fishery Issues*, 21(1), 5-19. (in Russ.).
16. Pavlov, D.A. (2022). The life cycle of two species of the genus *Carassius* (Cyprinidae) in Russia. *Environmental issues*, 62(6), 721-736. <https://doi.org/10.31857/S0042875222060285> (in Russ.).
17. Pospelova, E.S., Smolina, N.V. (2021). Ichthyofauna and fishery in the Tyumen region (south). *Actual issues of science and economy: new challenges and solutions. Collection of materials of the LV student scientific and practical conference*. Tyumen. 626-632. (in Russ.).
18. Pravdin, I.F. (1966). *Guide to the Study of Fish*. Moscow: Food Industry. 376. (in Russ.).
19. Filinova, S.A., & Interesova, E.A. (2023). On the issue of sexual dimorphism of the golden carp *Carassius carassius* (Cyprinidae). *Fish farming and fish industry*, 17, 5(208), 297-304. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2305-02> (in Russ.).
20. Yadrenkina, E.N., Interesova, E.A., Yadrenkin, A.V. & Khakimov, R.M. (2005). On the issue of spatial differentiation of carp fish populations in Lake Chany (Western Siberia). *Siberian Ecological Journal*, 12, 2, 293-304. (in Russ.).
21. Benson, D.A., Cavanaugh, M., Clark, K., Karsch-Mizrachi, I., Lipman, D.J., Ostell, J., & Sayers, E.W. (2013). GenBank. *Nucleic Acids Research*, 41, 1, 36-42. <https://doi.org/10.1093/nar/gks1195>.
22. Häneling, B., Bolton, P., Harley, M., & Carvalho, G.R. (2005). A molecular approach to detect hybridisation between crucian carp (*Carassius carassius*) and non-indigenous carp species (*Carassius spp.* and *Cyprinus carpio*). *Freshwater Biology*, 50, 403-417. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01330.x>.
23. Haynes, G.D., Gongora, J., & Gilligan, D.M., et al. (2012). Cryptic hybridization and introgression between invasive Cyprinid species *Cyprinus carpio* and *Carassius auratus* in Australia: implications for invasive species management. *Animal Conservation*, 15, 83-94. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2011.00490.x>.
24. Katoh, K., & Standley, D.M. (2013). MAFFT multiple sequence alignment software version 7: improvements in performance and usability. *Mol Biol Evol*, 30, 4, 772-780.
25. Letunic, I., & Bork, P. (2024). Interactive Tree of Life (iTOL) v6: recent updates to the phylogenetic tree display and annotation tool. *Nucleic Acids Res*, 5 (52), 78-82. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae268>.
26. Papošek, I., Vetešník, L., & Halacka, K., et al. (2008). Identification of natural hybrids of gibel carp *Carassius auratus gibelio* (Bloch) and crucian carp *Carassius carassius* (L.) from lower Dyje River floodplain (Czech Republic). *Journal of Fish Biology*, 72, 1230-1235. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01783.x>.
27. Sakai, H., Iguchi, K., Yamazaki, Y., Sideleva, V.G., & Goto, A. (2009). Morphological and mtDNA sequence studies on three crucian carps (*Carassius*: Cyprinidae) including a new stock from the Ob River system, Kazakhstan. *Journal of Fish Biology*, 74, 1756-1773. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02203.x>.
28. Stamatakis, A. (2014). RAxML version 8: a tool for phylogenetic analysis and post-analysis of large phylogenies. *Bioinformatics. Oxford Academic*, 30, 9, 1312-1313.
29. Takada, M. (2010). Biogeography and evolution of the *Carassius auratus*-complex in East Asia. *BMC evolutionary biology*, 1(10), 1-18. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-10-7>



30. Tapkir, S., Bukal, D.S., Kalus, L., Barton, D.K., Souza, A.T., Kolar, V., Soukalaova, K., Duchet, K., Gottwald, M., & Shmeikal, M. (2022). Invasive gibel carp (*Carassius gibelio*) outperforms threatened native crucian carp (*Carassius carassius*) in growth rate and effectiveness of resource use: Field and experimental evidence. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 12 (32), 1901-1912. <https://doi.org/10.1002/aqc.3894>.
31. Tarkan, A.S., Almeida, D., Godard, M.J., Gaygusuz, O., Rylands, M., Sayer, C.D., Zięba, G., & Copp, G.H. (2016). A review and meta-analysis of growth and life-history traits of a declining European freshwater fish, crucian carp *Carassius carassius*. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst*, 26, 212-224. <https://doi.org/10.1002/aqc.2580>.
32. Wouters, J., Janson, S., Lusková, V., & Olsén, K.H. (2012). Molecular identification of hybrids of the invasive gibel carp *Carassius auratus gibelio* and crucian carp *Carassius carassius* in Swedish waters. *Journal of Fish Biology*, 80, 2595-2604. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03312.x>.

Литература

1. Аннотированный каталог круглоротых и рыб континентальных вод России. Москва: Наука, 1998. 220 с.
2. Апаликова О.В. Филогенетический анализ двух форм серебряного карася *Carassius auratus gibelio* Bloch на основе изменчивости митохондриальной ДНК / Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2008. 24 с.
3. Апаликова О.В., Подлесных А.В., Кухлевский А.Д. и др. Филогенетические отношения серебряных карасей *Carassius auratus gibelio* и *C. auratus cuvieri*, золотого карася *C. carassius* и карпа *Cyprinus carpio* на основе изменчивости митохондриальной ДНК // Генетика. 2011. Т. 47, № 3. С. 368-378.
4. Атлас пресноводных рыб России: в 2 т. / под ред. Ю. С. Решетникова. Москва: Наука, 2003. Т. 1. 379 с.
5. Бакина А.В., Янкова Н.В. Многолетняя динамика размерно-весовых и морфофизиологических показателей золотого карася озера Андреевское // Вестник государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2017. № 1 (36). С. 6-10.
6. Битнер М.И., Смолина Н.В. Некоторые цитогенетические особенности популяций *Carassius gibelio* и *Carassius carassius*, обитающих в гидрологически разнотипных водных объектах бассейна реки Тура // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2023. Т. 63, № 3. С. 47-57. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/23-3/04>.
7. Берг Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран: в 3 ч. Москва; Ленинград: Издательство АН СССР, 1949. Ч. 2. С. 467-926.
8. Горюнова А.И., Исбеков К.Б., Асылбекова С.Ж., Данько Е.К. О карасях периодически высыхающих степных озёр Северного Казахстана в свете современных отечественных и зарубежных исследований // Промысловые виды и их биология. Труды ВНИРО. 2017. Т. 165. С. 27-44.
9. Журавлев В.Б. Рыбы бассейна Верхней Оби. Барнаул: Алтайский университет, 2003. 291 с.
10. Интересова Е.А., Ростовцев А.А., Суслиев В.В., Блохин А.Н., Богомолова И.Н., Лялина М.И. Пространственная организация населения рыб водоемов южной тайги Западной Сибири (в пределах Томской области // Экология. 2020. № 2. С. 125-133. <https://doi.org/10.31857/S0367059720020031>.
11. Кафанова В.В. Методы определения возраста и роста рыб. Томск: Издательство Томского университета, 1984. 53 с.

12. Котегов Б.Г. Изменчивость счетных признаков золотого карася – *Carassius carassius* (L.) (Cyprinidae, Actinopterygii) из малых прудов с разным уровнем антропогенного загрязнения // Поволжский экологический журнал. 2017. № 1. С. 46-53. <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2017-1-46-53>.
13. Котегов Б.Г. Закономерности изменчивости дискретных признаков сейсмосенсорной системы головы у пресноводных рыб в неоднородных гидрохимических условиях / Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Астрахань, 2024. 46 с.
14. Лакин Г.Ф. Биометрия. Москва: Высшая школа, 1990. 352 с.
15. Монахов С.П., Аськеев А.О., Аськеев И.В., Шаймуратова Д.Н., Аськеев О.В., Смирнов А.А. Прошлое и настоящее видов рода *Carassius* Средневолжского района // Вопросы рыболовства. 2020. Т. 21, № 1. С. 5-19.
16. Павлов Д.А. Жизненный цикл двух видов рода *Carassius* (Cyprinidae) в условиях симпатрии // Вопросы ихтиологии. 2022. Т. 62. № 6. С. 721-736. <https://doi.org/10.31857/S0042875222060285>.
17. Поспелова Е.С., Смолина Н.В. Ихтиофауна и промысел в Тюменской области (юг) // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. Сборник материалов LV студенческой научно-практической конференции. Тюмень. 2021. С. 626-632.
18. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. Москва: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.
19. Филинова, С.А., Интересова Е.А. К вопросу о половом диморфизме золотого карася *Carassius carassius* (Cyprinidae) // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2023. Т. 17, № 5(208). С. 297-304. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2305-02>.
20. Ядренкина Е.Н. , Интересова Е.А., Ядренкин А.В., Хакимов Р.М. К вопросу о пространственной дифференциации популяций карповых рыб озера Чаны (Западная Сибирь) // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12, № 2. С. 293-304.
21. Benson D.A., Cavanaugh M., Clark K., Karsch-Mizrachi I., Lipman D.J., Ostell J., Sayers E.W. GenBank // Nucleic Acids Research, 2013. Vol. 41, 1, P. 36–42. <https://doi.org/10.1093/nar/gks1195>.
22. Hänfling B., Bolton P., Harley M., Carvalho G.R. A molecular approach to detect hybridisation between crucian carp (*Carassius carassius*) and non-indigenous carp species (*Carassius spp.* and *Cyprinus carpio*) // Freshwater Biology. 2005. Vol. 50. P. 403-417. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01330.x>.
23. Haynes G.D., Gongora J., Gilligan D.M. et al. Cryptic hybridization and introgression between invasive Cyprinid species *Cyprinus carpio* and *Carassius auratus* in Australia: implications for invasive species management // Animal Conservation. 2012. Vol. 15. P. 83-94. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2011.00490.x>.
24. Katoh K., Standley D.M. MAFFT multiple sequence alignment software version 7: improvements in performance and usability // Mol Biol Evol. Mol Biol Evol, 2013. Vol. 30, № 4. P. 772-780.
25. Letunic I., Bork P. Interactive Tree of Life (iTOL) v6: recent updates to the phylogenetic tree display and annotation tool // Nucleic Acids Res, 2024. Vol. 5. P. 78-82. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae268>.
26. Papošek I., Vetešník L., Halacka K. et al. Identification of natural hybrids of gibel carp *Carassius auratus gibelio* (Bloch) and crucian carp *Carassius carassius* (L.) from lower Dyje River floodplain (Czech Republic) // Journal of Fish Biology. 2008. Vol. 72. P. 1230-1235. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01783.x>.

27. Sakai H., Iguchi K., Yamazaki Y., Sideleva V.G., Goto A. Morphological and mtDNA sequence studies on three crucian carps (Carassius: Cyprinidae) including a new stock from the Ob River system, Kazakhstan // Journal of Fish Biology. 2009. Vol. 74. P. 1756-1773. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02203.x>.
28. Stamatakis A. RAxML version 8: a tool for phylogenetic analysis and post-analysis of large phylogenies // Bioinformatics. Oxford Academic, 2014. Vol. 30, № 9. P. 1312-1313.
29. Takada M. Biogeography and evolution of the *Carassius auratus*-complex in East Asia // BMC evolutionary biology. 2010. Vol. 10. P. 1-18. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-10-7>.
30. Tapkir S., Bukal D.S., Kalus L., Barton D. K., Souza A.T., Kolar V., Soukalaova K., Duchet K., Gottwald M., Shmeikal M. Invasive gibel carp (*Carassius gibelio*) outperforms threatened native crucian carp (*Carassius carassius*) in growth rate and effectiveness of resource use: Field and experimental evidence // Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. 2022. № 12 (32). C. 1901-1912. <https://doi.org/10.1002/aqc.3894>.
31. Tarkan A.S., Almeida D., Godard M.J., Gaygusuz O., Rylands M., Sayer C.D., Zięba G., Copp G.H. A review and meta-analysis of growth and life-history traits of a declining European freshwater fish, crucian carp *Carassius carassius* // Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst. 2016. Vol 26. P. 212–224. <https://doi.org/10.1002/aqc.2580>.
32. Wouters J., Janson S., Lusková V., Olsén K.H. Molecular identification of hybrids of the invasive gibel carp *Carassius auratus gibelio* and crucian carp *Carassius carassius* in Swedish waters // Journal of Fish Biology. 2012. Vol. 80. P. 2595-2604. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03312.x>.

дата поступления: 25.09.2025

дата принятия: 10.10.2025

© Bitner M.I., Smolina N.V., Utkin Y.A., 2025

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ / ECOLOGY AND NATURE MANAGEMENT

УДК 630*114.261/263:582.475 (470.21)
<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>

Живов Д.А., Сухарева Т.А.

ЗАПАСЫ АЗОТА И УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ЕЛОВЫХ ЛЕСОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

D.A. Zhivov, T.A. Sukhareva

NITROGEN AND CARBON RESERVES IN THE SOILS OF SPRUCE FORESTS OF THE MURMANSK REGION

Аннотация. Лесные экосистемы играют важную роль в регулировании циклов углерода и азота, выступая природными резервуарами химических элементов. Настоящее исследование направлено на получение новых и уточнение уже существующих данных по запасам углерода и азота в почвах северотаёжных лесов. Эта информация особенно актуальна для отдельных регионов в связи с изменением климата и антропогенными воздействиями. Акцент на Мурманской области обусловлен недостаточной изученностью пулов углерода в почвах северных лесов, в которых особенности температурного и гидрологического режимов могут существенно повлиять на запасы органического вещества. В статье представлены результаты исследования запасов органического углерода (C_{org}) и азота (N) в почве еловых лесов Мурманской области. Объектом исследования послужили Al-Fe-гумусовые подзолы в ельниках кустарничково-зеленомошных в автоморфных позициях ландшафта. В июле–августе 2023 г. обследовано 5 пробных площадей, в пределах которых проведен отбор почвенных проб в доминирующих элементарных биогеоарелях: в межкроновых (кустарничково-зеленомошных) и подкроновых (под *Picea obovata* Ledeb. и *Betula pubescens* Ehrh.) пространствах. Показаны особенности профильного распределения запасов углерода и азота в органогенном (лесной подстилке) и минеральных горизонтах, а также накопление C_{org} и N в минеральных слоях 0–10, 0–30, 0–100 см. Под пологом ели выявлены наибольшие запасы углерода и азота в лесной подстилке. Общие запасы (органогенный горизонт + минеральный слой 0–100 см) углерода всех исследуемых биогеоареалах сопоставимы – 116,7–119,3 т/га. Запас C_{org} в подстилке составляет 13–22% от его общих запасов в почве. Запасы N в органогенном горизонте имеют сходные значения

Abstract. Forest ecosystems play an important role in regulating the carbon and nitrogen cycles, serving as natural reservoirs of chemical elements. This study aims to obtain new data and refine existing information on carbon and nitrogen stocks in the soils of northern taiga forests. This information is particularly relevant for certain regions due to climate change and anthropogenic impacts. The focus on the Murmansk Region is due to the insufficient knowledge of carbon pools in the soils of northern forests, where specific temperature and hydrological regimes can significantly affect organic matter stocks. The article presents the results of a study on organic carbon (C_{org}) and nitrogen (N) stocks in the soil of spruce forests in the Murmansk Region. The study object was Al-Fe-humus podzols in dwarf shrub-green moss spruce forests in automorphic landscape positions. In July–August 2023, five sample plots were surveyed. Within these plots, soil samples were collected in the dominant elementary biogeoregions: in inter-crown areas (dwarf shrub-green moss) and under-crown spaces (under *Picea obovata* Ledeb. and *Betula pubescens* Ehrh.). The study reveals the characteristics of the profile distribution of carbon and nitrogen stocks in the organogenic horizon (forest floor) and mineral horizons. It also demonstrates the accumulation of C_{org} and N in the mineral layers at depths of 0–10 cm, 0–30 cm, and 0–100 cm. The highest reserves of C_{org} and N in the forest litter were found under the spruce canopy. The total reserves (organogenic horizon + mineral layer 0–100 cm) of C_{org} in all studied biogeoregions are comparable and amount to 116,7–119,3 t/ha. The reserve of C_{org} in the litter is 13,3–21,8% of its total reserves in the soil. The reserves of N in the organogenic horizon are comparable for the under- and inter-canopy spaces and amount to 0,63–0,70



для подкроновых и межкроновых пространств – 0,63–0,70 т/га. Общие запасы N (16,4 т/га) и запасы N (15,9 т/га) в метровом слое почвы максимальны под кронами *Betula pubescens*. В межкроновых пространствах и под кронами *Picea obovata* общие запасы азота – 14,5–14,8 т/га. Запасы N в подстилке составляет 2,9–4,9% от его общих почвенных запасов. Таким образом, основные запасы почвенного азота (до 95%) и углерода (до 82%) залегают ниже органогенного горизонта и приходятся на минеральный слой 0–100 см.

Ключевые слова: почва; северотаежные ельники; углерод; азот; автоморфные ландшафты; Мурманская область.

Сведения об авторах: Живов Дмитрий Андреевич, ORCID: 0009-0002-4670-0144, ведущий инженер; Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия, d.zhivov@ksc.ru; Сухарева Татьяна Алексеевна, ORCID: 0000-0001-6451-3495, заведующий лабораторией, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия, t.sukhareva@ksc.ru.

t/ha. The total N reserves (16,4 t/ha) and N reserves (15,9 t/ha) in the 1-meter soil layer are maximum under the *Betula pubescens* crowns. In the inter-crown spaces and under the *Picea obovata* crowns, the total nitrogen reserves are 14,5–14,8 t/ha. The N reserves in the litter are 2,9–4,9% of the total soil N reserves. Thus, the main reserves of soil nitrogen (up to 95%) and carbon (up to 82%) are located below the organogenic horizon and are found in the mineral layer of 0–100 cm.

Keywords: soil; North taiga spruce forests; carbon; nitrogen; automorphic landscapes; Murmansk region.

About the authors: Dmitry A. Zhivov, ORCID: 0009-0002-4670-0144, Senior Engineer; Institute of Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, d.zhivov@ksc.ru; Tatyana A. Sukhareva, ORCID: 0000-0001-6451-3495, Head of the Laboratory, Institute of Industrial Ecology of the North, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, t.sukhareva@ksc.ru.

Живов Д.А., Сухарева Т.А. Запасы азота и углерода в почвах еловых лесов Мурманской области // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 84-101.
<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>

Zhivov, D.A., & Sukhareva, T.A. (2025). Nitrogen and Carbon Reserves in the Soils of Spruce Forests of the Murmansk Region. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 84-101. (in Russ.).
<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>

В настоящее время оценка содержания и запасов углерода в почвах лесных экосистем приобрела особую значимость в связи с изменением климата и антропогенным воздействием [6; 13; 17]. На территории России сосредоточено 22% мировых лесных ресурсов и более половины boreальных лесов планеты [10]. Несмотря на это, ранее они часто игнорировались в контексте международных усилий по смягчению последствий изменения климата, хотя служат значительным стоком углерода [14; 22; 32].

Данные по запасам углерода в почвах – важнейшая составляющая баланса углерода в лесных экосистемах. На современном этапе накопилось большое количество работ по оценке глобальных и региональных запасов органического углерода в почвах [6; 13; 36, 39 и др.]. По некоторым данным, лесные экосистемы Земли содержат более 70% глобального пула почвенного углерода [29]. Основным источником углерода почв является растительный опад, качество которого (содержание элементов питания, величина соотношения C:N) определяет скорость его разложения почвенной биотой и, соответственно, скорость и объемы перехода углерода в почвенные пулы [7; 25; 31]. При анализе углеродного баланса основное внимание уделяется наземной растительности, а не

почвенному компоненту [5; 26], поэтому существуют неопределенности в оценке запасов углерода в почвах, в том числе северотаёжных лесов.

Кроме того, недостаточно актуальных сведений о пространственном распределении и почвенных пулов углерода в почвах бореальных лесов, которые вносят весомый вклад в глобальный цикл углерода [22; 34], являясь значительным резервуаром органического вещества. Лесные почвы бореального пояса содержат 15 % мировых запасов почвенного углерода [35; 37]. Потепление климата может привести к интенсификации процессов разложения органических остатков в бореальных лесах и, соответственно, к увеличению поступления CO₂ из почвы в атмосферу. Запасы азота находятся в тесной зависимости от запасов углерода, т.к. почти весь азот в почве находится в составе органического вещества.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки роли северных экосистем в углеродном балансе, а также потребностью в данных для прогнозирования и снижения негативных эффектов углеродсодержащих газов [34] в условиях современных климатических изменений.

Полученные результаты помогут в восполнении дефицита актуальных количественных данных по запасам углерода и азота в почвах северотаежных лесов и станут основой для региональных оценок углеродного баланса и мониторинга в условиях меняющегося климата. В дальнейшем, материалы могут быть интегрированы в национальные программы учёта системы выбросов и поглощения парниковых газов, при проектировании природоохранных мероприятий и карбоновых проектов. Полученные результаты позволят расширить представления о функционировании северных экосистем и их роли в биогеохимических циклах, а также будут полезны для разработки стратегий сохранения и рационального использования природных ресурсов Европейского Севера РФ.

Цель работы – оценка запасов углерода и азота в подзолах иллювиально-гумусовых ненарушенных (фоновых) ельников кустарничково-зеленомошных Мурманской области в автоморфных позициях ландшафта.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в июле-августе 2023 г. в ельниках кустарничково-зеленомошных, расположенных на юго-западе Мурманской области (Кандалакшский район, окрестности с. Алакуртти) (рис. 1). Заложено 5 пробных площадей в автоморфных позициях ландшафта, которые расположены на небольшой гряде, вытянутой с юга на север с незначительным понижением рельефа к северу, 295–330 м над ур. м.

Почвы на пробных площадях формируются на супесчаной морене и представлены Al-Fe-гумусовыми подзолами [4] с типичным для них профилем: O-E-BHF-C, или Carbic Podzols (Arenic), согласно классификации WRB 2022 [40]. Древостой представлен в основном елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и берёзой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), разновозрастный, V класса бонитета. Господствующими жизненными формами напочвенного покрова являлись кустарнички (*Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hager.) и мхи (*Pleurozium schreberi* Brid., *Hylocomium splendens* Hedw.). Из лишайников небольшими пятнами произрастают представители рода *Cladonia*. Общее проективное покрытие растительностью – 90–95%.



Рис. 1. Карта расположения пробных площадей.

Примечание: пробные площади имеют следующие координаты:
ПП № 1: 66,952220 с.ш. 29,862220 в.д; ПП № 2: 66,952780 с.ш. 29,863060 в.д;
ПП № 3: 66,953890 с.ш. 29,846440 в.д; ПП № 4: 66,947780 с.ш. 29,860000 в.д;
ПП № 5: 66,948610 с.ш. 29,861670 в.д.

Исследования проводили с учётом внутрибиогеоценотического варьирования. На каждой пробной площади почвенные пробы отбирали в 3-кратной повторности в доминирующих элементарных биогеоарелах (ЭБГА): еловом кустарничково-зеленомошном (проективное покрытие 20–40%), березовом кустарничково-зеленомошном (20–25%), кустарничково-зеленомошном (20–35%). Пробы отбирали по генетическим горизонтам: органогенный горизонт (О), элювиальный (гор. Е), иллювиальный (гор. ВНФ) и почвообразующая порода (гор. С). Для определения запаса подстилки у каждого почвенного разреза отбирали почвенный монолит рамкой 25x25 см² на всю глубину органогенного горизонта, измеряли мощность. В лабораторных условиях проводили ручной разбор почвенных монолитов на подгоризонты OL, OF и OH, при этом корни растений извлекали. Подгоризонт опада (OL) представляет собой верхний слой, состоящий из свежих или слаборазложившихся растительных остатков, таких как листья, хвоя, кора, ветки, опад напочвенного покрова. Подгоризонт ферментации (OF) состоит из полуразложившихся растительных остатков, в которых еще сохраняются признаки анатомического строения. Подгоризонт гумификации (OH) состоит в основном из полностью разложившегося, гумифицированного органического вещества и имеет более плотную и темную однородную структуру [12]. Определяли абсолютно сухую массу каждого подгоризонта подстилки. Образцы на плотность минеральных горизонтов почвы отбирали почвенным буром диаметром 5,5 см для каждого разреза. Определение плотности сложения почвы проводили по методу Н.А. Качинского.

Полевые и камеральные работы по исследованию почв выполнены согласно методическим рекомендациям, разработанных участниками научно-образовательного консорциума «Углерод в экосистемах: мониторинг» в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ).

Содержание углерода и азота в пробах определяли методом прямого сжигания на элементном анализаторе CHNS EMA 502 (VELP, Италия).

Для определения запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$) использовали данные по мощности, плотности почвенных горизонтов и содержанию в них углерода. Расчет запаса углерода в лесной подстилке проводили путем умножения абсолютно сухой массы почвы на содержание углерода. Расчет запасов $C_{\text{орг}}$ в минеральной толще почвы выполняли по формуле (1) [6]:

$$C_{\text{запас}} = C_{\text{орг}} \times \rho \times h \times 0,01, \quad (1)$$

где $C_{\text{запас}}$ – запас углерода в почве, т/га; $C_{\text{орг}}$ – содержание органического углерода в почве, %; ρ – плотность почвы, г/см³; h – толщина расчётного слоя почвы, см; 0,01 – коэффициент перевода единиц (учитывает: % → доля, г/см³ → т/га при h в см).

Аналогично определили запасы азота в почве.

Расчеты запасов проводили для фиксированных минеральных слоев 0–10, 0–30 и 0–100 см с учетом доли мелкозема. Полученные данные обрабатывали в программных пакетах MS Excel (описательная статистика) и Statistica 13.3 (U-критерий Манна-Уитни).

Результаты и обсуждение

Средняя мощность органогенного горизонта (O) в межкроновом пространстве составила $8,7 \pm 2,3$ см, под кроной ели – $9,0 \pm 2,9$ см, под кроной берёзы – $9,3 \pm 1,6$ см. В работе Е.М. Лаптевой и др. [8] есть предположение, что практически все почвы, формирующиеся в автоморфных позициях ландшафтов Приполярного Урала, вне зависимости от характера растительного покрова, обладают близкими значениями мощности органогенных горизонтов – 4–5 см. При этом, мощность органогенного горизонта в автоморфных позициях ландшафта на наших объектах исследования также не зависела от элементарного биогеоареала и в среднем составляла 8–9 см. Полученные нами данные по мощности подстилки сходны с результатами, полученными для подзолов Мурманской области [9; 15], Республики Коми [1; 2; 6; 18], Республики Карелия [19].

При оценках почвенных пуллов углерода и азота исследователи отмечают нехватку данных по плотности почв [16], что вносит ряд сложностей в расчёты запасов элементов. Нами установлено, что почва межкроновых пространств является более плотной. Плотность подзолистого горизонта (E) составляет $1,32 \pm 0,24$ г/см³; иллювиального горизонта (BHF) – $1,22 \pm 0,35$ г/см³; подгоризонта BC – $1,30 \pm 0,12$ г/см³. В подкроновых пространствах почва менее плотная. Под пологом ели плотность горизонта E – $1,13 \pm 0,09$ г/см³; горизонта BHF – $0,94 \pm 0,15$ г/см³, под пологом березы $1,02 \pm 0,20$ и $1,12 \pm 0,22$ г/см³ соответственно. Различия в плотности межкроновых и подкроновых пространств обусловлены разницей в фитомассе корневых систем, которая под кроной деревьев выше. Доля мелкозёма (<2мм) в почвах изменилась в диапазоне от 92,8 до 100%.

Особенности распределения запасов азота и углерода в органогенных и минеральных горизонтах представлены на рисунке 2.

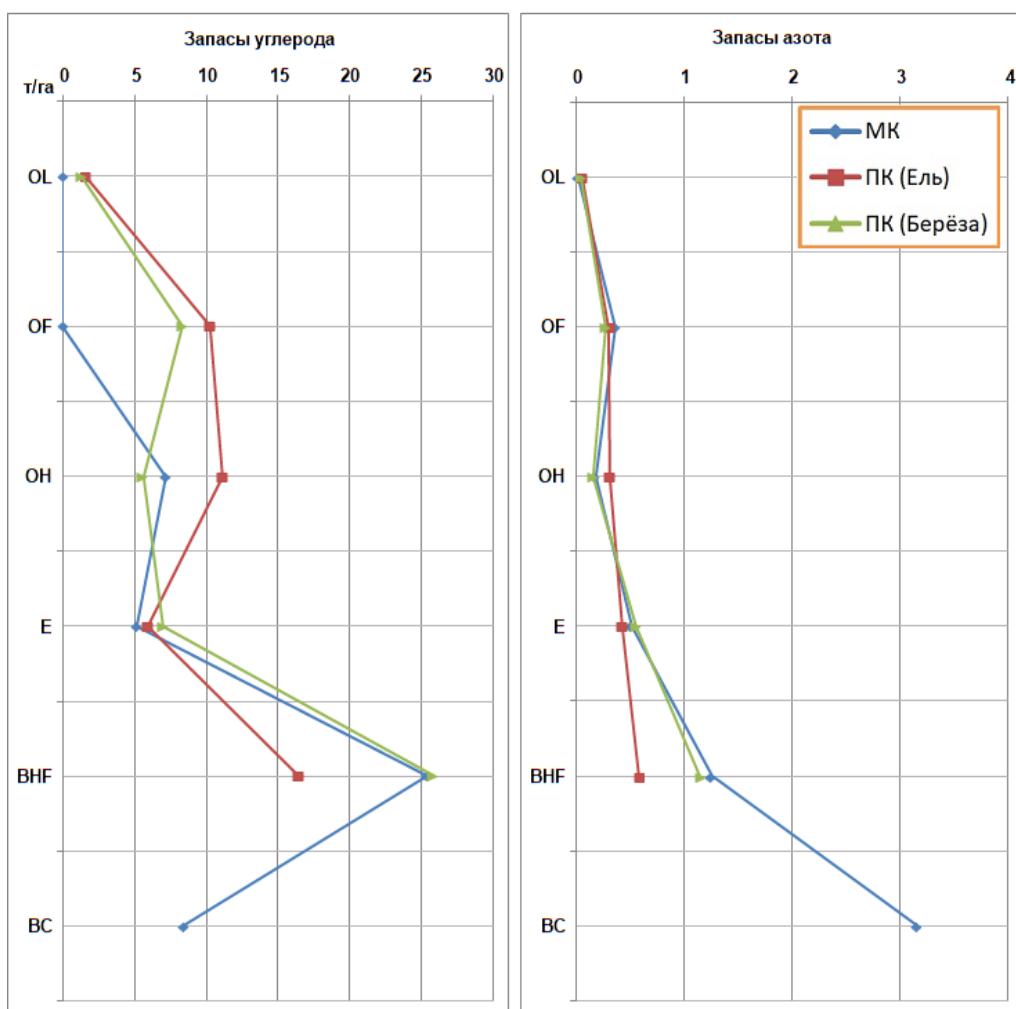


Рис. 2. Распределение запасов углерода азота по генетическим горизонтам почв в автоморфных ельниках кустарничково-зеленоношных Мурманской области, т/га.
Примечание: МК – межкроновые пространства, n=5, ПК (ель) – подкроновые еловые пространства, n=5, ПК (береза) – подкроновые березовые пространства, n=5

В автоморфных ландшафтах запасы углерода в органогенном горизонте (O) варьируют от 14 до 34 т С/га. В подгоризонтах подстилки запасы варьировали от 0,21 до 2,23 т С/га (гор. OL), от 3,48 до 21,57 т С/га (гор. OF), в (гор. OH) – от 2,14 до 20,30 т С/га. В минеральных горизонтах – от 2 до 12 т С/га (гор. E) и от 10 до 39 т С/га (гор. BHF), в подгоризонте (гор. BC) – от 5 до 13 т С/га. В подстилке меж- и подкроновых пространствах запасы углерода в подгоризонте OL ниже, чем в подгоризонтах OF и OH, что объясняется более интенсивным поступлением растительного опада под кронами деревьев. При этом наибольшие запасы углерода ($p \leq 0,05$) в подстилке отмечены под кроной *Picea obovata*. Максимальные запасы углерода ($p \leq 0,05$) отмечены в иллювиальном горизонте BHF почв.

Запасы азота в органогенном горизонте (O) варьируют от 0,34 до 0,90 т N/га. В подгоризонтах подстилки варьировали незначительно – от 0,01 до 0,08 т N/га (гор. OL), от 0,13 до 0,48 т N/га (гор. OF), в (гор. OH) – от 0,08 до 0,57 т N/га. В минеральных горизонтах – от 0,23 до 0,74 т N/га (гор. E) и от 0,24 до 2,01 т N/га (гор. BHF), в подгоризонте (гор. BC) – от 0,72 до 7,99 т N/га. Наиболее высокое содержание N отмечено в подгоризонте BC.

Запасы азота (N) в подстилке и минеральных слоях (0–10, 0–30 и 0–100 см) представлены на рисунке 3. Запасы N в органогенном горизонте варьировали под кроной ели от 0,6 до 0,9, под кроной березы – от 0,3 до 0,5, между крон – от 0,5 до 0,7 т/га. Рассчитанные средние значения запасов N в подстилке сопоставимы для подкроновых и межкronовых пространствах (рис. 3). Запасы N в минеральном слое 0–100 см под кроной ели изменялись в диапазоне от 7,3 до 20,3, под кроной березы – от 13,2 до 20,1, между крон – от 8,4 до 19,1 т/га. Максимальные запасы N ($p \leq 0,05$) в метровом слое почвы отмечены под кроной берёзы ($15,9 \pm 2,9$ т/га). Запасы азота в минеральном слое 0–100 см в межкronовом и подкроновом еловом пространстве характеризуются более низкими значениями (14–14,1 т/га). В слое 0–10 см содержится 0,43–0,97 т/га, в слое 0–30 см – около четверти запаса от метрового слоя (1,85–4,52 т/га).

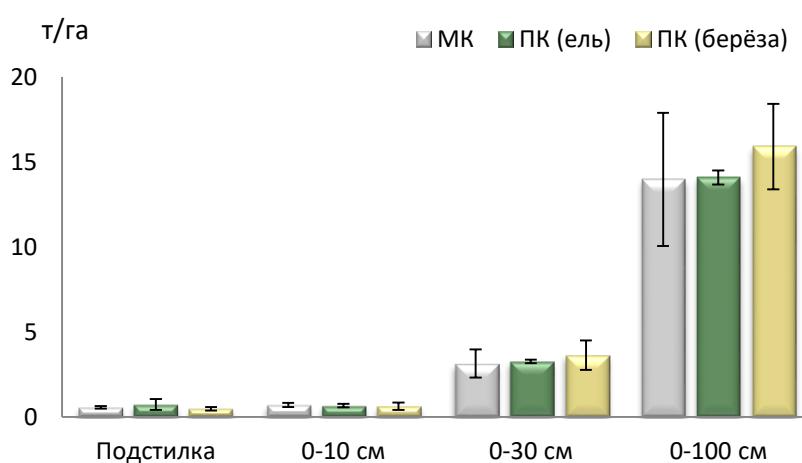


Рис. 3. Запасы азота в органогенном горизонте почвы и минеральных слоях (0–10, 0–30 и 0–100 см) в автоморфных ельниках кустарничково-зеленошных Мурманской области, т/га. Примечание: приведены средние значения и стандартное отклонение. МК – межкronовые пространства, $n=5$, ПК (ель) – подкronовые еловые пространства, $n=5$, ПК (береза) – подкроновые березовые пространства, $n=5$

Общие запасы N (подстилка + минеральный слой 0–100 см) также выше под кроной березы – 16,4 т/га. В подкроновом еловом пространстве общие запасы N составляют $14,8 \pm 4,5$ т/га, между кронами – $14,5 \pm 4,0$ т/га.

Запас N в подстилке составляет 2,9–4,9% от его общих почвенных запасов. Таким образом, основные запасы залегают ниже органогенного горизонта, зоны активной деятельности корней.

Запасы углерода ($C_{опр.}$) в подстилке и минеральных слоях 0–10, 0–30 и 0–100 см представлены на рис. 4. Запасы $C_{опр.}$ в органогенном горизонте варьировали под кроной ели от 19,8 до 33,9, под кроной березы – от 14,4 до 18,2, между крон – от 14,3 до 23,8 т/га. Запасы $C_{опр.}$ в минеральном слое 0–100 см под кроной ели изменялись в диапазоне от 67,19 до 135,2, под кроной березы – от 81,2 до 135,7, между крон – от 58,8 до 131,2 т/га. Рассчитанные средние запасы $C_{опр.}$ в подстилке снижаются в ряду: под кроной ели (25,5 т/га) > между крон (21,2 т/га) > под кроной березы (15,8 т/га). Наибольшие запасы углерода ($p \leq 0,05$) в

подстилке и минеральном слое 0–10 см еловых пространств по сравнению с межкроновыми и подкronовыми березовыми пространствами могут объясняться более мощным пологом ели и большим количеством трудно разлагаемого опада хвои. В минеральном слое 0–100 см наблюдается обратная тенденция: максимальные запасы $C_{\text{орг}}$ отмечены под подкроновым березовым пространством (103,4 т/га), минимальные в межкроновом и подкроновом пространстве (91,7–95,5 т/га). В слое 0–10 см содержится 3,2–17,2 т/га, в слое 0–30 см – около трети запасов углерода от метрового слоя (25,1–47,8 т/га).

Общие запасы $C_{\text{орг}}$ всех исследуемых биогеоареалов сопоставимы и составляют 116,7–119,3 т/га.

Запас $C_{\text{орг}}$ в подстилке составляет 13,3–21,8% от его общих запасов в почве (рис. 3). Основные запасы углерода (до 82%) приходятся на метровый слой почвы. Полученные результаты согласуются с данными, полученными для дерново-подзолистых почв лесной зоны европейской территории России (в т. ч. территория «Чашниково», расположенная в Солнечногорском районе Московской области) в полугидроморфных и автоморфных условиях [20].

Высокий уровень вариабельности запасов N и $C_{\text{орг}}$ (рис. 3 и 4) связан с небольшим объемом выборки ($n=5$) и значительной пространственной неоднородностью в пределах отдельной пробной площади.

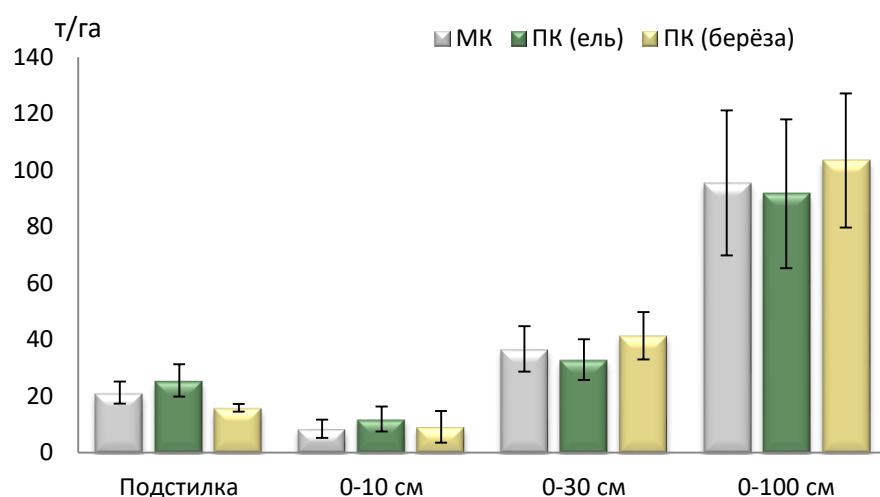


Рис. 4. Запасы углерода в органогенном горизонте почвы и минеральных слоях (0–10, 0–30 и 0–100 см) в автоморфных ельниках кустарничково-зеленоносных Мурманской области, т/га.

Примечание: МК – межкроновые пространства, $n=5$, ПК (ель) – подкроновые еловые пространства, $n=5$, ПК (береза) – подкроновые березовые пространства, $n=5$

Вопрос о роли подстилки в депонировании органического углерода вызывает научные дискуссии, что обусловлено комплексным характером данного процесса. Некоторые исследователи [21] указывают на относительно невысокий вклад подстилки в общий пул углерода (5–6%), что может казаться недостаточным для признания её существенного влияния на углеродный баланс экосистемы.

Однако такой подход требует более глубокого анализа. При детальном сравнительном рассмотрении становится очевидным, что оценка роли подстилки должна учитывать не только абсолютные значения содержания С_{орг.}, но и дополнительные факторы регионально-климатического характера, такие как: климатическая зональность (в условиях Севера процессы разложения органического вещества существенно замедлены, что способствует аккумуляции углерода в верхних горизонтах), особенности почвообразования (в северных экосистемах органогенный горизонт формируется специфическим образом, создавая особые условия для консервации углерода), скорость деструкции (низкая температура и короткий вегетационный период приводят к замедлению минерализации органического вещества, что усиливает роль подстилки как временного депо углерода), структура экосистемы (в бореальных и субарктических ландшафтах подстилка является важным компонентом, влияющим на формирование всего почвенного профиля).

Исследования [1-3; 6; 8; 11; 14; 21] демонстрируют, что в почвах северных территорий именно органогенный горизонт выступает ключевым аккумулятором углерода, что обусловлено совокупностью вышеперечисленных факторов. Таким образом, исключение подстилки из оценки углероддепонирующей способности почв может привести к существенному искажению общей картины углеродного баланса экосистемы.

Следовательно, несмотря на относительно невысокие процентные показатели, вклад подстилки в общий пул углерода нельзя недооценивать, особенно в условиях северных экосистем, где она выполняет уникальные функции в системе углеродного цикла.

Анализ литературных данных показывает варьирование запасов углерода в почвах на покрытых лесом землях РФ (табл. 1) и в отдельных регионах страны (табл. 2). [1; 2; 6; 13; 14; 21]

Таблица 1

**Запасы углерода в почвах покрытых лесом земель
в России по оценкам различных исследователей, т/га.**

Запасы С _{орг.} т/га		Автор/год
Подстилка	Слой 0–100 см	
–	170	Орлов Д.С. и др., 1996
–	203	Rozhkov V.A. et al. 1996
18	96, (86)	Alexeyev B.N., Birdsey R., 1998, (1994)
15	115	Nilsson I. et al., 2000
–	148	Уткин А.И. и др., 2001
–	159	Швиденко А.З. и др., 2003
–	125	Исаев А. и др., 2004
–	137	Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., 2004
–	253	Сонген Б. и др., 2005
–	159	Замолодчиков Д.Г. и др., 2005
–	115	Stolbovoi V., 2006
7,2	162	Честных О.В. и др., 2004; 2007
10,1	176	Щепашенко Д.Г. и др., 2013
9	136	Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., 2014

Примечание: * «–» – данные отсутствуют.



Таблица 2

**Запасы органического углерода в почвах северных регионов РФ
по оценкам различных исследователей, т/га**

Регион	Запасы С _{орг.} т/га		Почвы	Автор/год
	Подстилка	Слой 0-100 см		
Мурманская область (северная тайга)	16–21	92–103	Альфегумусовые подзолы	Собственные данные
Республика Карелия (средняя тайга)	11–61	39–402	Подзолы, песчаные и супесчаные	Бахмет О.Н., 2018
Республика Коми (северная тайга)	5	29–68	Подзол иллювиально-железистый	Дымов А.А., 2020
	12–27	88–101	Подзолистые почвы, торфянисто-подзолисто-глеевые	Бобкова К.С. и Галенко Э.Л., 2006
Республика Коми (средняя тайга)	16–35	57–141	Подзолистые почвы, торфянисто-подзолисто-глеевые	Бобкова К.С. и Галенко Э.Л., 2006
	14–16	79–169	Типичные подзолы	Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В., 2014
	29	141–161	Глееподзолы-Иллювиально-гумусово-железистые	
	30	51	Альфегумусовые подзолы	Пастухов А.В., Каверин Д.А., 2013
Приполярный Урал	21 (\pm 14)	106 (\pm 42)	Подзолы	Лаптева Е.М. и др., 2022

Наши исследования показывают, что содержание углерода в почвах северотаежных лесов Мурманской области, как правило, ниже, чем в целом в почвах на покрытых лесом землях в РФ.

В Мурманской области запасы углерода в лесной подстилке и минеральном слое 0–100 см в еловых лесах в автоморфных ландшафтах соответствуют значениям, полученными другими исследователями для северной и средней подзон тайги в Республике Коми и Республике Карелия (табл. 1).

Известно, что тип почвы влияет на запасы углерода в почвенном профиле [14] и является фактором, определяющим эти запасы [14; 23; 24; 33]. По этой причине потребность в исследовании складывается не только в отношении регионального аспекта, но и всех приуроченных к нему типов почв со всеми изменениями ландшафтов. Ключевым факторами является также интенсивность биогеохимических циклов и степень антропогенного воздействия на экосистемы. Полученные данные согласуются с глобальными трендами распределения почвенного углерода в бореальной зоне, что подтверждается современными климатическими моделями и исследованиями углеродного баланса северных территорий [28; 38]. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния климатических изменений на динамику

почвенного углерода с учетом специфики региональных почвенных процессов и ландшафтно-климатических условий.

Выводы

1. В ненарушенных ельниках кустарничково-зеленомошных Мурманской области в автоморфных позициях ландшафта мощность органогенного горизонта составляла 8–9 см и не зависела от элементарного биогеоареала (подкроновые и межкроновые пространства).

2. Запасы С_{орг.} в подстилке еловых лесов снижались в ряду: под кронами ели ($25,5 \pm 5,7$ т/га) > между кронами ($21,2 \pm 3,9$ т/га) > под кронами берёзы ($15,8 \pm 1,4$ т/га). Наибольшие запасы С_{орг.} в подстилке еловых пространств по сравнению с межкроновыми и подкроновыми березовыми пространствами могут объясняться более мощным пологом ели и большим количеством опавшей хвои. Запасы N в подстилке были сопоставимы для подкроновых и межкроновых пространств.

3. Анализ распределения запасов углерода по генетическим горизонтам показал, что его основные запасы сосредоточены в органогенном (O) и иллювиальном (BHF) горизонтах. Максимальные запасы в почвенных горизонтах выявлены под кроной *Picea obovata*, что связано с интенсивным поступлением и медленным разложением хвойного опада. В подстилке наибольший вклад в запасы углерода вносят подгоризонты OF и OH, тогда как в минеральных горизонтах доминирующим пулом углерода является горизонт BHF.

4. Профильное распределение запасов азота по почвенным горизонтам свидетельствует о его низких запасах в органогенном и элювиальном горизонтах, и высоких – в иллювиальном (BHF) горизонте и в подгоризонте (BC), что может указывать на значительный потенциал к депонированию углерода не только в почве корнеобитаемой зоны, но и в минеральных горизонтах.

5. Основные запасы почвенного N (до 96%) и С_{орг.} (до 82%) залегают ниже органогенного горизонта и приходятся на минеральный слой 0–100 см. Под кронами берёз выявлены максимальные запасы С_{орг.} ($103,4 \pm 23,8$ т/га) и N ($15,9 \pm 2,9$) в метровом слое почвы.

6. Подстилка северотаежных лесов содержит весомую часть запасов С_{орг.} – 13,3–21,8% от общего пула углерода, поэтому её нельзя игнорировать при оценке углероддепонирующей способности лесных почв.

Полученные данные подчёркивают важность учёта глубоких почвенных слоёв, пространственной неоднородности почвы, физико-климатических особенностей региона исследования и внутрибиогеоценотического разнообразия при оценке углеродно-азотного баланса северотаёжных экосистем.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» и в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № 1023032200043-6.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудником Центра коллективного пользования физико-химических методов анализа ИППЭС КНЦ РАН за выполнение химико-аналитических работ, а также сотрудникам лаборатории наземных экосистем к.б.н. В.В. Ершову и инженеру Н.С. Рябову за помощь в проведении полевых работ. Авторы признательны также инженеру И.М. Штабровской за построение карты объектов исследования.

Литература

1. Бобкова К.С. Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаёжных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
2. Дымов, А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>.
3. Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар, 1975. 343 с.
4. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
5. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1686-1702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>.
6. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. С.-Пб.: Наука, 2006. 354 с.
7. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803-816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>.
8. Лаптева Е.М., Шахтарова О.В., Холопов Ю.В., Денева С.В. Оценка запасов органического углерода в почвах низкогорных ландшафтов Приполярного Урала // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Киров, 01 декабря 2022 года). Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 132-135. EDN CLFXBF.
9. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 341 с.
10. Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е. и др. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. Москва: КМК, 2018. 232 с. EDN YSMYH.
11. Малышева Н., Золина Т., Филипчук А. Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов // Известия вузов. Лесной журнал. 2025. Вып. 1, февраль. С. 83-97. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>.
12. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в лесных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН, 2024. 114 с.
13. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М., 1996.
14. Осипов А.Ф., Старцев В.В., Прокушkin A.C., Дымов А.А. Запасы углерода в почвах лесов Красноярского края: анализ роли типа почвы и древесной породы // Теоретическая и прикладная экология. 2023. С. 67-74. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-067-074>.

15. Переверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 231 с.
16. Рыжова И.М., Подвезненная М.А., Кириллова Н.П. Вариабельность запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем Европейской территории России: сравнительный статистический анализ // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 2.
17. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере / Отв.ред. Г.В. Добровольский. М.: Геос, 1999. 278 с.
18. Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми / Коми научный центр УрО РАН. Сыктывкар, 2014. 202 с.
19. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Ахметова Г.В., Новиков С.Г., Ткаченко Ю.Н., Соловьевников А.Н. Тяжёлые металлы в почвах Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.
20. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезненная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340-350.
21. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>. EDN PNQXGL.
22. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. 2015. Vol. 128. P. 24-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>.
23. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. P. 339-348. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030023>.
24. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey // Geoderma. 2015. Vol. 251-252. P. 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>.
25. Gleixner G. Soil Organic Matter Dynamics, a Biological Perspective Derived from the Use of Compound-Specific Isotopes Studies // Ecological Research. 2013. Vol. 28. P. 683-695. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-1022-9>.
26. Hartley I.P., Hill T.C., Chadburn C.E., Hugelius G. Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. P. 6713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-021-27101-1>.
27. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Sixth Assessment Report [Electronic resource] / IPCC. Electronic data. 2021. Access at: URL: <https://clck.ru/3QstcX> (accessed: 30.04.2025).
28. IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press.
29. Jandl R., Lindner M., Vesterdal L. et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? // Geoderma. 2007. Vol. 137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.
30. Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V. et al. Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects // Forest science issues. 2021. Vol. 1. № 4. P. 1-60. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60>.
31. Lukina N.V., Orlova M.A., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Smirnov V.E., Belova E.A. Mass-loss rates from decomposition of plant residues in spruce forests near the northern tree

line subject to strong air pollution // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. Iss. 24. P. 19874-19887. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9348-z>.

32. Moen J., Rist L., Bishop K. et al. Eye on the taiga: removing global policy impediments to safe guard the boreal forest // Conservation Letters. 2014. Vol. 7. Iss. 4. P. 408-418. <https://doi.org/10.1111/conl.12098>.

33. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional. 2021. Vol. 27. Article № e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>.

34. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada) // An International Journal of Forest Research. 2019. Vol. 92. P. 264-277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz004>.

35. Post W.M., Kwon K.C., Melillo J.M. et al. Soil carbon pools and world life zones // Nature. 1982. Vol. 298. P. 156-159.

36. Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool // Carbon Management. 2014. Vol. 5. № 1. P. 81-91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>.

37. Schlesinger W.H. Carbon storage in soils of the northern taiga // Canadian Journal of Forest Research. 1977. Vol. 7. P. 21-29.

38. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., and Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochemical Cycles. 2009. Vol. 23. GB 2023. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>.

39. Walker M.D., Wahren C.H., Hollister R.D., Henry G.H.R., Ahlquist L.E., Alatalo J.M., BretHarte M.S., Calef M.P., Callaghan T.V., Carroll A.B., Epstein H.E., Jonsdottir I.S., Klein J.A., Magnusson B., Molau U., Oberbauer S.F., Rewa S.P., Robinson C.H., Shaver G.R., Suding K.N., Thompson C.C., Tolvanen A., Totland O., Turner P.L., Tweedie C.E., Webber P.J., Wookey P.A. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome // Proc. of the National Academy of Sciences. 2006. Vol. 103(5). P. 1342-1346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.0503198103>.

40. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences. (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200417>.

References

1. Bobkova, K.S. Mashika, A.V., & Smagin, A.V. (2014). Dinamika soderzhaniya ugleroda organiceskogo veshhestva v srednetayozhnyx el'nikax na avtomorfnyx pochvax. SPb.: Nauka, 270 s. (in Russ.).
2. Dy'mov, A.A. (2020). Sukcessii pochv v boreal'nyx lesax Respubliki Komi. M.: GEOS, 336 s. <https://doi.org/10/34756/GEOS.2020.10.37828>. (in Russ.).
3. Zaboeva, I.V. (1975). Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR. Sy'kty`vkar, 343 s. (in Russ.).
4. Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii. (2004). Smolensk: Ojkumena, 342 s. (in Russ.).
5. Kopcik, G.N., Kopcik, S.V., Kupriyanova, Yu.V., Kadulin, M.S., & Smirnova, I.E. (2023). Ocenna zapasov ugleroda v pochvax lesnyx e`kosistem kak osnova monitoringa klimaticheski aktivnyx veshhestv. *Pochvovedenie*, 12, 1686-1702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>. (in Russ.).
6. Korennyye elovy'e lesa Severa: bioraznoobrazie, struktura, funkci. (2006). S.-Pb.: Nauka, 354 s. (in Russ.).

7. Kuzneczova, A.I., Lukina, N.V., Tixonova, E.V., Gornov, A.V., Gornova, M.V., Smirnov, V.E., Geras'kina, A.P., Shevchenko, N.E., Teben'kova, D.N., & Chumachenko, S.I. (2019). Akkumulyaciya ugleroda v peschanyx i suglinistyx pochvax ravninnyx xvojno-shirokolistvennyx lesov v xode poslerubochnyx vosstanovitel'nyx sukcessij. *Pochvovedenie*, 7, 803-816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>. (in Russ.).
8. Lapteva, E.M., Shaxtarova, O.V., Xolopov, Yu.V., & Deneva, S.V. Ocena zapasov organicheskogo ugleroda v pochvax nizkogornyx landshaftov Pripolyarnogo Urala. *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnyx i prirodno-texnogennyx sistem: Materialy XX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Kirov, 01 dekabrya 2022 goda)*. Kirov: Vyatskij gosudarstvennyj universitet, 2022. S. 132-135. EDN CLFXBF. (in Russ.).
9. Lukina, N.V., Polyanskaya, L.M., & Orlova, M.A. (2008). Pitatel'nyj rezhim pochv severotaezhnyx lesov. M.: Nauka, 341 s. (in Russ.).
10. Lukina, N.V., Tixonova, E.V., & hevchenko, N.E. i dr. (2018). Akkumulyaciya ugleroda v lesnyx pochvax i sukcensionnyj status lesov. Moskva: KMK, 232 s. EDN YSMMYH. (in Russ.).
11. Maly'sheva, N., Zolina, T., & Filipchuk, A. (2025). Zapasy ugleroda v pochvax po materialam gosudarstvennoj inventarizacii lesov. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*, 1, fevral', 83-97. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>. (in Russ.).
12. Metodicheskie rekomendacii po provedeniyu issledovanij na probnyx ploshhadyax seti intensivnogo urovnya monitoringa dlya ocenki zapasov ugleroda v lesnyx e'kosistemax: geobotanicheskie issledovaniya, otbor pochvennyx obrazcov, otbor rastitel'nyx obrazcov. (2024). Vazhnejshij innovacionnyj proekt «Edinaya nacional'naya sistema monitoringa klimaticheski aktivnyx veshhestv» (VIP GZ). Moskva: CzE`PL RAN, 114 s. (in Russ.).
13. Orlov, D.S., Biryukova, O.N., & Suxanova, N.I. (1996). Organicheskoe veshhestvo pochv Rossijskoj Federacii. M. (in Russ.).
14. Osipov, A.F., Starcev, V.V., Prokushkin, A.S., & Dy'mov, A.A. (2023). Zapasy ugleroda v pochvax lesov Krasnoyarskogo kraja: analiz roli tipa pochvy i drevesnoj porody. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. S. 67-74. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-067-074>. (in Russ.).
15. Pereverzev, V.N. (2004). Lesnye pochvy Kol'skogo poluostrova. M.: Nauka, 231 s. (in Russ.).
16. Ry'zhova, I.M., Podvezennaya, M.A., & Kirillova, N.P. (2022). Variabel'nost' zapasov ugleroda v avtomorfnyx i polugidromorfnyx pochvax lesnyx e'kosistem Evropejskoj territorii Rossii: sravnitel'nyj statisticheskij analiz. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. № 2. (in Russ.).
17. Strukturno-funktional'naya rol' pochvy v biosfere (1999). Otv.red. G.V. Dobrovol'skij. M.: Geos, 278 s. (in Russ.).
18. Uglerod v lesnyx i bolotnyx e'kosistemax osobo ohranyaemyx prirodnyx territorij Respubliki Komi (2014). Komi nauchnyj centr UrO RAN. Sy'kty'vkar, 202 s. (in Russ.).
19. Fedorecz, N.G., Baxmet, O.N., Medvedeva, M.V., Axmetova, G.V., Novikov, S.G., Tkachenko, Yu.N., & Solodovnikov, A.N. (2015). Tyazhyolye metally v pochvax Karelii. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 222 s. (in Russ.).
20. Chernova, O.V., Ry'zhova, I.M., Podvezennaya, M.A. (2020). Ocena zapasov organicheskogo ugleroda lesnyx pochv v regional'nom masshtabe. *Pochvovedenie*, 3, 340-350. (in Russ.).
21. Shhepashhenko, D.G., Muxortova, L.V., Shvidenko, A.Z., & Vedrova, E.F. (2013). Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvax Rossii. *Pochvovedenie*, 2, 123. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>. EDN PNQXGL. (in Russ.).



22. Bradshaw, C.J.A., & Warkentin, I.G. (2015). Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global and Planetary Change*, 128, 24-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>.
23. Chernova, O.V., Ryzhova, I.M., & Podvezennaya, M.A. (2020). Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale. *Eurasian Soil Science*, 53, 339-348. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030023>.
24. De Vos, B., Cools, N., Ilvesniemi, H., Vesterdal, L., Vanguelova, E., & Carnicelli, S. (2015). Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey. *Geoderma*, 251-252, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>.
25. Gleixner, G. (2013). Soil Organic Matter Dynamics, a Biological Perspective Derived from the Use of Compound-Specific Isotopes Studies. *Ecological Research*, 28, 683-695. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-1022-9>.
26. Hartley, I.P., Hill, T.C., Chadburn, C.E., & Hugelius, G. (2021). Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities. *Nat. Commun.*, 12, 6713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-021-27101-1>.
27. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Sixth Assessment Report [Electronic resource] / IPCC. Electronic data. Access at: URL: <https://clck.ru/3QstcX> (accessed: 30.04.2025).
28. IPCC. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press.
29. Jandl, R., Lindner, M., & Vesterdal, L. et al. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.
30. Lukina, N.V., Geraskina, A.P., & Gornov, A.V. et al. (2021). Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects. *Forest science issues*, 1, 4, 1-60. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60>.
31. Lukina, N.V., Orlova, M.A., Steinnes, E., Artemkina, N.A., Gorbacheva, T.T., Smirnov, V.E., & Belova, E.A. (2017). Mass-loss rates from decomposition of plant residues in spruce forests near the northern tree line subject to strong air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 24, 19874-19887. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9348-z>.
32. Moen, J., Rist, L., & Bishop, K. et al. (2014). Eye on the taiga: removing global policy impediments to safe guard the boreal forest. *Conservation Letters*, 7, 4, 408-418. <https://doi.org/10.1111/conl.12098>.
33. Osipov, A.F., Bobkova, K.S., & Dymov, A.A. (2021). Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional*, 27, Article № e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>.
34. Paradis, L., Thiffault, E., & Achim, A. (2019). Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *An International Journal of Forest Research*, 92, 264-277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz004>.
35. Post, W.M., Kwon, K.C., & Melillo, J.M. et al. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298, 156-159.
36. Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5, 1, 81-91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>.

37. Schlesinger, W.H. (1977). Carbon storage in soils of the northern taiga. *Canadian Journal of Forest Research*, 7, 21-29.
38. Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G., & Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB 2023. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>.
39. Walker, M.D., Wahren, C.H., Hollister, R.D., Henry, G.H.R., Ahlquist, L.E., Alatalo, J.M., BretHarte, M.S., Calef ,M.P., Callaghan, T.V., Carroll, A.B., Epstein, H.E., Jónsdóttir, I.S., Klein, J.A., Magnusson, B., Molau, U., Oberbauer, S.F., Rewa, S.P., Robinson, C.H., Shaver, G.R., Suding, K.N., Thompson, C.C., Tolvanen, A., Totland, O., Turner ,P.L., Tweedie, C.E., Webber, P.J., & Wookey, P.A. (2006). Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 103(5), 1342-1346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.0503198103](https://doi.org/10.1073/pnas.0503198103).
40. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences. (2022). (IUSS), Vienna, Austria, 236 p. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200417>.

дата поступления: 20.10.2025

дата принятия: 08.12.2025

© Живов Д.А., Сухарева Т.А., 2025

УДК 622.276.5.001.4:543

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/08>

T.J. Gogoi, S.B. Gogoi, T.V. Storchak, D. Konwar

CORRELATION ANALYSIS AND HYDROCHEMICAL FACIES OF CONTAMINANT IONS IN OILFIELD PRODUCED WATER OF THE UPPER ASSAM BASIN

Гогой Т.Д., Гогой С.Б., Сторчак Т.В., Конвар Д.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАСТВОРИЕННЫХ ИОНОВ В ПЛАСТОВЫХ ВОДАХ НЕФТЕЯДОЛЮДИЙ ВЕРХНЕАССАМСКОГО БАССЕЙНА

Abstract. The oil field produced water from the Upper Assam Basin, generated during oil and gas exploration and production, contains high levels of contaminants, including inorganic elements and anions, which pose significant environment and health risks. To address these challenges, we employed the Piper class scatter plot and correlation analysis methods to develop new correlations and gain a deeper understanding of the complex relationships among these contaminants. Our analysis revealed elevated concentrations of Na, Li, Sr, Pb and F exceeding the permissible limits set by India's Central Pollution Control Board, highlighting their potential environmental and health impacts. In contrast, Cr, Cu, Mo and Ni were absent, reflecting varying geochemical influences. The study also examined the roles of Ca and Mg in water hardness and scaling, as well as the severe environmental risks associated with high levels of Zn and Pb. Notably, the Piper class scatter plot analysis identified calcium bicarbonate $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ as the predominant component, providing a clearer view of the water's chemical composition. Correlation analysis, supported by empirical data, indicated that Na is positively correlated with other inorganic parameters, with a proportionality constant of 2.1×10^{-5} . These findings underscore the need for advanced treatment methods to mitigate excessive contaminants and enhance sustainable management practices. The study highlights the importance of employing sophisticated analytical techniques to improve environmental stewardship and operational efficiency in the oil and gas industry.

Keywords: contaminants; correlation; environment; proportionality constant; relationships.

Аннотация. Попутно добываемая вода (ПДВ) из месторождений Верхнеассамского бассейна, образующаяся в процессе разведки и добычи нефти и газа, характеризуется высоким уровнем загрязняющих веществ, включая неорганические элементы и анионы, что создает значительные экологические и медицинские риски. Для решения этих задач в данном исследовании были использованы методы диаграммы рассеяния Пайпера и корреляционного анализа с целью разработки новых корреляционных зависимостей и получения более глубокого понимания сложных взаимосвязей между указанными загрязнителями. Проведенный анализ выявил повышенные концентрации Na, Li, Sr, Pb и F, превышающие допустимые пределы, установленные Центральным советом по контролю за загрязнением Индии (CPCB), что подчеркивает их потенциальное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. В противоположность этому, элементы Cr, Cu, Mo и Ni обнаружены не были, что отражает варьирующее геохимическое влияние. В работе также исследованы роль Ca и Mg в формировании жесткости воды и образовании отложений (скейлинга), а также серьезные экологические риски, связанные с высокими уровнями Zn и Pb. Примечательно, что анализ с использованием диаграммы Пайпера позволил идентифицировать бикарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ в качестве преобладающего компонента, что обеспечивает более четкое представление о химическом составе воды. Корреляционный анализ, подтвержденный эмпирическими данными, указал на наличие положительной корреляции между Na и другими неорганическими параметрами с коэффициентом пропорциональности, равным 2.1×10^{-5} . Полученные результаты подчеркивают необходимость применения advanced методов очистки для снижения чрезмерной концентрации загрязняющих веществ и повышения эффективности практик устойчивого природопользования. Проведенное исследование демонстрирует важность использования sophisticated аналитических методик для совершенствования

About the authors: Dr. Tapan Jyoti Gogoi, ORCID: 0000-0002-6401-5485, Rajiv Gandhi Institute of Petroleum Technology (RGIFT), Sivasagar Campus, Assam, India Department of Petroleum Technology Dibrugarh University, Dibrugarh, Assam, India, tapanjyotigogoi77@gmail.com; Dr. Subrata Borgohain Gogoi, ORCID: 0000-0001-6347-5853, Professor, Department of Petroleum Technology Dibrugarh University, Dibrugarh, Assam, India, subrata@dibru.ac.in; Tatiana V. Storchak, ORCID: 0000-0002-5926-433X, Candidate of Biological Sciences, Nizhnevartovsk State University Nizhnevartovsk, Russia, tatyana.storchak@yandex.ru; Dr. Debasish Konwar, ORCID: 0000-0002-3432-7525, Department of Petroleum Technology Dibrugarh University, Dibrugarh, Assam, India, konwar.debasish110@gmail.com.

экологического менеджмента и операционной эффективности в нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: загрязняющие вещества; корреляция; окружающая среда; коэффициент пропорциональности; взаимосвязи.

Сведения об авторах: Тапан Джигити Гогой, ORCID: 0000-0002-6401-5485, д-р, Институт нефтяных технологий имени Раджива Ганди (RGIFT), Ассам, Индия, Факультет нефтяных технологий Университета Дубрагарх, Дубрагарх, Ассам, Индия, tapanjyotigogoi77@gmail.com; Субрато Боргохайн Гогой, ORCID: 0000-0001-6347-5853, д-р, профессор, Факультет нефтяных технологий Университета Дубрагарх, Дубрагарх, Ассам, Индия, subrata@dibru.ac.in; Татьяна Викторовна Сторчак, ORCID: 0000-0002-5926-433X, канд. биол. наук, Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, tatyana.storchak@yandex.ru; Дебасиш Конвар, ORCID: 0000-0002-3432-7525, д-р, Факультет нефтяных технологий Университета Дубрагарх, Дубрагарх, Ассам, Индия, konwar.debasish110@gmail.com.

Gogoi T.J., Gogoi S.B., Storchak T.V., Konwar D. Correlation analysis and hydrochemical facies of contaminant ions in oil field produced water // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 101-122. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/08>

Gogoi, T.J., Gogoi, S.B., Storchak, T.V., & Konwar, D. (2025). Correlation Analysis and Hydrochemical Facies of Contaminant Ions in Oilfield Produced Water of the Upper Assam Basin. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 101-122. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/08>

Introduction

Oil-field produced water (OFPW) constitutes the predominant volume of fluid generated during oil and gas exploration and production (E&P) operations, representing both a critical environmental challenge and a significant operational management concern [11; 17; 36; 54]. This study focuses on the Upper Assam Basin (UAB), in northeastern India, located approximately between 26° 54' N–26° 58' N latitude and 94° 35' E–94° 58' E longitude, one of India's major on-shore petroleum provinces. The UAB features a complex geological structure with productive horizons spanning the Paleocene through Miocene strata, including formations such as the Barail Main Sand (BMS), Barail Coal Shale (BCS) and Tipam Sand (TS-IV) [5; 34; 55]. These formations overlie basement rocks and are interbedded with sandstones, siltstones and mudstones, creating multiple productive pay zones with varying pressure and temperature regimes. In the studied Rudrasagar oil field, depths of 3000–3300 m, pressure gradients of 2800–4000 psi and temperature gradients of 80–110 °C are reported. With production from these mature fields having reached its peak, the volume of OFPW is rising markedly. The basin's geological complexity, together with water-to-oil ratios exceeding 90% in certain Barail horizon wells, contributes to the generation of large quantities of OFPW [14; 16; 20; 45].



The contamination observed in these waters originates from both natural geochemical processes, including mineral dissolution from carbonate and silicate lithologies, ion exchange reactions, and subsurface brine concentration, and operational sources such as corrosion of infrastructure, chemical additives used in drilling and well-treatment, and mixing with formation (connate) waters [3; 18; 31; 38]. Understanding the specific geochemical fingerprint of UAB OFPW is essential for developing basin-specific treatment and management strategies that satisfy regulatory compliance under India's Central Pollution Control Board (CPCB) standards, as well as for promoting sustainable environmental stewardship.

The American petroleum institute (API) estimated that approximately 18 billion barrels of OFPW were generated by the US onshore operations in 1995 [3; 26; 52]. Khatib Z. and Verbeek P. [38], indicated that the global estimates suggested an average of 77 billion barrels annually. It is estimated that onshore oil and gas wells in the United States generated approximately 21, 18, and 14 billion barrels of OFPW annually in the years 1985, 1995, and 2001, respectively [8; 25; 49]. Recent data from major oil industries of UAB further illustrate this trend, with substantial volumes reported in their sustainability reports [1; 10; 16; 55; 56].

The chemical composition of untreated OFPW is complex and influenced by factors such as geographical location, geological formation, reservoir life, and hydrocarbon type [5; 15; 22]. This complexity includes a range of inorganic elements and anions (IEA), such as sodium (Na), calcium (Ca), magnesium (Mg), arsenic (As), fluoride (F), chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), and others. Understanding these constituents is essential for developing effective treatment strategies and managing environmental impacts [2; 9; 20; 23; 53].

High concentrations of both soluble and insoluble salts in OFPW can cause scaling and corrosion in pipes, as well as equipment fouling, leading to increased maintenance costs and potential equipment failure. Moreover, heavy metals present in OFPW are highly toxic to aquatic life, even at low concentrations. These metals do not readily break down and can persist in the environment for extended periods. They can also co-precipitate with other substances, complicating their separation and removal during treatment [4; 14; 19; 43]. Additionally, the Piper class scatter plot serves as a powerful tool for visualizing the ionic composition of OFPW. By plotting elements and anions on a Piper diagram, researchers can categorize water types, reveal patterns, and develop new correlations that enhance our understanding of water chemistry. This plot offers valuable insights into the interrelationship between different ionic constituents and assist to identify distinctive chemical signatures associated with various oil fields [15; 21; 29; 34].

This study aims to conduct a comprehensive analysis of the IEA present in untreated OFPW, utilizing advanced analytical techniques and Piper class scatter plots. Our objective is to develop new correlations and gain deeper insights into the chemical behaviour of OFPW. These insights will support the development of more effective treatment processes and sustainable environmental management strategies. In the subsequent sections, we will outline the methodology used for sample collection and analysis, present our findings, and discuss their implications. Through this research, we seek to enhance our understanding of OFPW chemistry and contribute to improved management practices in the oil and gas industry.

Geological setting and origin of contaminants in upper Assam basin produced water

The UAB is an intracontinental rift basin characterised by a complex stratigraphic succession that records multiple phases of marine transgression and regression. The productive intervals contain highly saline formation waters (paleowaters) that have undergone prolonged diagenesis and extensive ion-exchange processes [20; 38; 49]. The elevated concentrations of dissolved inorganic elements and anions observed in the present study are consistent with a combination of geochemical and operational processes:

(a) *Natural dissolution processes*: Interaction of subsurface waters with carbonate lithologies (limestone and dolomite) and evaporitic minerals leads to enrichment in Na^+ , Ca^{2+} and HCO_3^- . The identification of $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ facies through Piper diagram interpretation supports a carbonate-dominated geochemical signature in these reservoirs [51; 56].

(b) *Ion-exchange and mineral weathering*: Clay water reactions and weathering of silicate minerals such as feldspar and mica contribute K, Sr and trace elements to the aqueous phase. The presence of Sr and Li is consistent with progressive mineral alteration and long residence times of formation waters in the subsurface [27; 46].

(c) *Anthropogenic contributions*: Corrosion of steel well casings, tubing and surface equipment can introduce Fe, Pb and Zn, while chemical treatment fluids used during drilling, stimulation and well maintenance may contribute F and other anions [19; 35; 53].

(d) *Redox controlled species*: The detection of low but measurable concentrations of As and Mn indicates reducing subsurface conditions in which these species occur predominantly as As^{3+} (arsenite) and Mn^{2+} . The absence or near-absence of oxidised species such as chromate and molybdate further corroborates the reducing redox environment typical of petroleum reservoirs [8; 24; 49].

Materials and Methods

Sampling of OFPW. Five crude oil (CO) samples were collected from five distinct wellheads (S1, S2, S3, S4, S5) within the Rudrasagar oil field having depth, pressure gradient and temperature gradient of 3000–3300 m, 2800–4000 psi and 80–110 °C respectively. Additionally, five OFPW samples (S6, S7, S8, S9, S10) were obtained from the central dehydration system (CDS) at Digboi. Sampling was conducted monthly over a six-month period. Both CO and OFPW samples were collected using one litre polyethylene bottles that had been pre-cleaned with deionized water. For each wellhead sample, CO was pumped directly in the bottle at a controlled flow rate to ensure representative sampling. After collection, the samples were promptly transported to the laboratory within 24 hours for gravity separation. The OFPW samples were then thoroughly mixed with diethyl ether ($(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$) in a separating funnel. This process resulted in a distinct separation into two layers, with the lower layer being collected for the determination of IEA [18; 39].

Subsequent analytical studies included the use of flame photometer (FP), atomic absorption spectrophotometer (AAS), inductively coupled plasma optical emission spectrophotometer (ICP-OES), and a multi parameter kit (MPK) to analyse various elements. Anion analysis was performed using titration methods (ASTM D 4458 – 15, ASTM D 3875 – 15) and gravimetric methods [22; 41]. The OFPW samples from the wellheads and CDS Digboi were analyzed within 48 hours of collection.

Analytical measurements of inorganic elements. In the FP, OFPW samples are atomized into a flame, which emits characteristic colours based on the inorganic elements (Na, K, Ca and Li) present. A photo detector, with a narrow-band filter for specific wavelengths, measures these emissions and provides a digital readout of element concentrations. Chromium (Cr), manganese (Mn), iron (Fe), copper (Cu), and As were analysed using AAS, which determines inorganic element concentrations based on their ability to absorb light at specific wavelengths [13; 20]. Before sample measurement, the AAS instrument was calibrated using a 2% HNO₃ blank solution to establish a baseline. Further, a series of standard solutions containing 1, 2, 3, and 4 ppm of As, Cr, Cu, Fe, and Mn were used to establish calibration for each metal.

ICP-OES was utilized to quantify the concentrations of magnesium (Mg), molybdenum (Mo), nickel (Ni), lead (Pb), strontium (Sr), and zinc (Zn), in OFPW by measuring the light emitted by atoms excited in an argon (Ar) plasma, where the high temperature excites the atoms and ions of the elements present. The intensity of the emitted light, which is directly proportional to the elemental concentration, was measured following calibration with standard solutions of known concentrations. Fluoride (F⁻) concentrations were determined using a MPK system equipped with an ion-selective electrode. To maintain a constant ionic strength and pH, 0.5 mL of total ionic strength adjustment buffer (TISAB) was added, and calibration was carried out using fluoride standard solutions of 0.1 ppm, 1 ppm, and 10 ppm prepared in equal proportions with the buffer [13; 20].

Analytical measurements of inorganic anions. The concentration of Cl⁻ ions in the OFPW was determined in accordance with ASTM D 4458 – 15. The method involves the precipitation of silver chloride (AgCl) by titration with 0.01N silver nitrate (AgNO₃). A few drops of 2N potassium chromate (K₂CrO₃) were used as an endpoint indicator. The chemical reaction at the endpoint is represented by equation 1:



HCO₃⁻ and CO₃²⁻ concentrations in the OFPW sample were determined following the ASTM D 3875 – 15 standard method, using titration with 0.05N H₂SO₄ and employing phenolphthalein and methyl orange as indicators. SO₄²⁻ was measured by titrating a 50 ml OFPW sample containing 3 drops of methyl red indicator, with H₂SO₄ until an orange-red color appeared. BaCl₄ was then added to precipitate BaSO₄, which was digested at 80–90°C. The precipitate was screened through warm distilled water until free of Cl⁻ ions, dried in a humidifier-controlled oven at 103°C, and then cooled in a desiccator before weighing [20; 40]. The SO₄²⁻ concentration was then determined using the equation 2 as follows:

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ in ppm} = \frac{\text{Amount of BaSO}_4 \times 411.5}{\text{Amount of OFPW sample}} \quad (2)$$

Results and Discussion

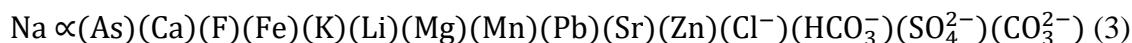
The concentrations of 20 IEAs obtained from 10 OFPW samples are summarized in Table 1-3. Analysing these IEAs is crucial for understanding their presence and impact on OFPW. Na concentrations in the OFPW samples ranged from 81.3 to 178.5 ppm, which are notably lower than the 3165 to 4480 ppm reported by Konwar D. et al. for the UAB oil field [40]. Potassium (K) levels were observed between 4.9 to 15.5 ppm, which also fall below the range of 39.1 to 275 ppm reported by the same study. In comparison, Li H. and Harati H.M. reported K concentrations of

5.8 to 8 ppm at the Wattenberg field and 59 to 64 ppm at the Al Hamada field, respectively [24; 43]. Ca concentrations in the present study ranged from 120 to 198 ppm, which is below the range of 344 to 982 ppm reported by Konwar D. et. al., but higher than the 24.2 to 34.8 ppm and 60 to 64 ppm ranges reported by Li H. and Harati H.M. for the Wattenberg and Al Hamada fields, respectively [24; 40; 43]. Mg concentrations were found to vary between 4.56 and 10.23 ppm.

Na^+ and Cl^- were the principal contributors to salinity and total dissolved solids (TDS), while Mg, Ca, and K contributed to a lesser extent [7; 17]. Lithium (Li) concentrations ranged from 0.54 to 1.28 ppm, Sr from 2.97 to 4.89 ppm, Fe from 0.21 to 0.48 ppm, and Zn from 0.52 to 1.29 ppm. Previous studies have reported Zn concentrations of 0.9 ppm at the Wattenberg field, and between 0.001 and 2.22 ppm at the Vafiflar field [6, 43]. Pb concentrations in the present study ranged from 0.44 to 0.78 ppm, Mn from 0.034 to 0.132 ppm, As from 0.0017 to 0.0054 ppm, and F from 4.5 to 8.7 ppm. No detectable concentrations of Cr, Mo, Cu, and Ni were observed in the OFPW samples.

Cl^- concentrations in the OFPW samples ranged from 64 to 115 ppm. HCO_3^- levels varied between 104 to 185 ppm, while CO_3^{2-} concentrations ranged from 50 to 90 ppm. SO_4^{2-} concentrations were observed within the range of 27 to 48 ppm. In comparison, Konwar D. et al. reported Cl^- concentrations ranging from 0.728 to 7.158 ppm in the UAB oil field, whereas Harati H.M. and Cakmakce et al. documented higher values, ranging from 442 to 479 ppm and 3199 to 4004 ppm, in the Al Hamada oil field and Vakiflar field respectively [6; 24; 40]. The experimental values for Ca, K, Zn and Cl^- were consistent with those of other researchers, but the Na values were notably lower than those reported in previous studies.

Equation 3, derived from the correlations presented in Table 2, indicates that Na is positively correlated with As, Ca, F, Fe, K, Li, Mg, Mn, Pb, Sr, Zn, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} and CO_3^{2-} . The validity of equation 3 was confirmed through the results illustrated in Figure 1.



From equation 3, the relationship can be formulated as follows,



where,

K_{IEA} = proportionality constant of IEA.

By applying the experimental values obtained during this research, we determined the K_{IEA} values to be 3 e^{-9} , 7 e^{-9} , 1 e^{-7} , 1 e^{-7} , 6 e^{-8} , 1 e^{-6} , 1 e^{-6} , 3 e^{-6} , 1 e^{-4} and 8 e^{-5} for samples S1 through S10, respectively. The average K_{IEA} value from equation 4 is 2.1 e^{-5} which represents the proportionality constant for the IEA.

Table 1

Concentrations of 20 IEAs in 10 OFPW samples

Parameter	Units	CPCB limit	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Na	ppm	100 (max)	152.8	178.5	102.5	148.7	130.6	95.8	115	90.2	84.7	81.3
K		20 (max)	15.5	12.3	9.5	10.8	8.7	7.7	8.3	6.5	5.2	4.9
Ca		200 (max)	198	185	148	157	168	146	149	131	120	126
Li		0.7 (max)	1.21	1.28	1.15	1.03	1.19	0.86	0.95	0.72	0.54	0.6
Mg		100 (max)	9.57	10.23	7.85	8.23	8.92	6.21	6.56	5.72	4.56	4.98
Sr		0.1 (max)	4.89	4.79	4.15	4.21	4.45	3.56	3.8	3.72	3.05	2.97
Fe		1 (max)	0.45	0.48	0.37	0.41	0.35	0.29	0.38	0.28	0.23	0.21
Zn		2 (max)	1.29	1.22	0.95	1.09	0.89	0.63	0.67	0.61	0.52	0.55
Pb		0.1 (max)	0.78	0.76	0.65	0.58	0.56	0.61	0.52	0.53	0.44	0.47
Mn		2 (max)	0.132	0.127	0.075	0.092	0.081	0.056	0.066	0.064	0.034	0.037
As		0.05 (max)	0.0054	0.0051	0.0042	0.0046	0.0048	0.0039	0.0035	0.0029	0.0017	0.002
F		1.5 (max)	8.7	8.4	7.2	7.9	7.5	5.3	6.2	6.5	4.5	4.9
Cr		1 (max)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu		0.2 (max)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mo		0.1 (max)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni		3 (max)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl ⁻		1000 (max)	115	113	91	77	108	88	74	79	69	64
HCO ₃ ⁻		200 (max)	185	177	147	128	172	137	120	130	112	104
CO ₃ ²⁻		200 (max)	90	90	70	60	80	70	60	60	50	50
SO ₄ ²⁻		100 (max)	48	42	38	35	39	35	34	33	27	29

Table 2

Correlation analysis of 16 IEAs in 10 OFPW samples

	Na	K	Ca	Li	Mg	Sr	Fe	Zn	Pb	Mn	As	F	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Na	1															
K	0.865348	1														
Ca	0.899404	0.947626	1													
Li	0.83613	0.85056	0.898746	1												
Mg	0.925836	0.894478	0.945606	0.967548	1											



Sr	0.889526	0.919751	0.94386	0.951444	0.97499	1													
Fe	0.928678	0.919408	0.895594	0.913172	0.924744	0.931604	1												
Zn	0.912902	0.954712	0.91547	0.880748	0.945716	0.930975	0.917729	1											
Pb	0.770944	0.915217	0.892376	0.833139	0.859514	0.866994	0.837289	0.881627	1										
Mn	0.929273	0.962026	0.955089	0.87138	0.941599	0.959228	0.937024	0.959581	0.913239	1									
As	0.85267	0.898871	0.930297	0.960215	0.955248	0.95515	0.90136	0.896014	0.861821	0.901017	1								
F	0.882493	0.903071	0.888526	0.90262	0.946198	0.97147	0.916334	0.946683	0.817586	0.951025	0.912397	1							
Cl ⁻	0.743383	0.798903	0.902136	0.860099	0.887171	0.895044	0.738848	0.789878	0.863186	0.845087	0.862701	0.790884	1						
HCO ₃ ⁻	0.755839	0.822616	0.911715	0.870222	0.900661	0.917783	0.757354	0.816408	0.864004	0.866236	0.874945	0.827332	0.996513	1					
SO ₄ ²⁻	0.777252	0.937529	0.95975	0.893558	0.906128	0.939449	0.845511	0.884241	0.933485	0.928257	0.920737	0.883291	0.923551	0.937476	1				
CO ₃ ²⁻	0.777691	0.8371	0.930761	0.879652	0.901616	0.905135	0.788557	0.811785	0.91094	0.878308	0.887629	0.803086	0.988636	0.981658	0.946029	1			

Table 3
Comparative analysis of inorganic element and anion concentrations in OFPW reported across different oilfield basins from previous research studies

Parameters	Units	Present study (n=10)	Çakmakce et al. (2008) Vakiflar field [6]	Harati HM (2012) Al Hamada field [24]	Konwar et al. (2017) UAB field [40]	Li H (2013) Wattenberg field [43]
Na	ppm	81.3–178.5	3165–4480	—	277–2794	—
K		4.9–15.5	—	59–64	39.1–275	5.8–8
Ca		120–198	—	60–64	344–982	24.2–34.8
Li		0.54–1.28	—	—	15–499.1	—
Fe		0.21–0.48	1.63–30	—	0.024–2.47	—
Zn		0.52–1.29	0.001–2.22	—	—	0.9
Pb		0.44–0.78	0.006–0.52	—	—	—
Cl ⁻		64–115	3199–4004	442–479	0.728–7.158	—
SO ₄ ²⁻		27–48	355–390	—	—	—

Note: Empty cells (—) indicate data not presented in the referenced study.



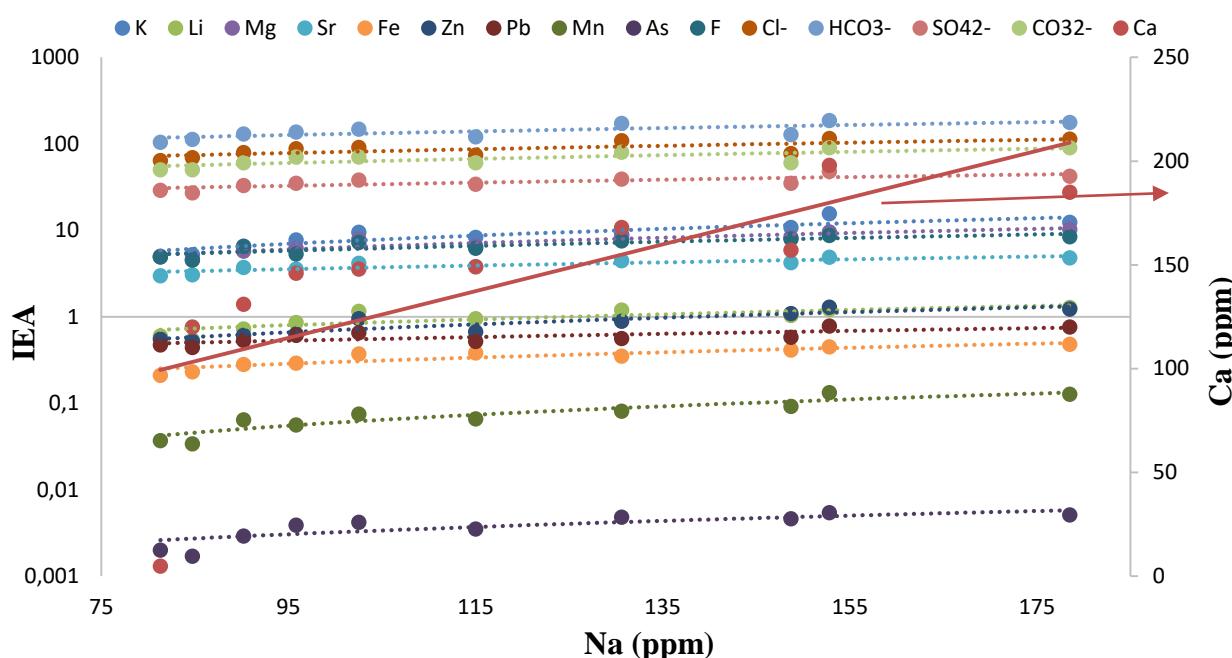


Fig. 1. Variation of 15 IEAs in response to Na concentration (ppm) across 10 OFPW samples

Establishing and Evaluating Relationships Between IEAs. Equation 4 was further validated by the linear trend lines presented in Figure 3 (a) – (h). The analysis revealed that Na is directly proportional to As, Ca, F, Fe, K, Li, Mg, Mn, Pb, Sr, Zn, (Cl^-), (HCO_3^-), (SO_4^{2-}) and (CO_3^{2-}).

In Figure 2 (a), the relationship between Ca and K relative to Na was plotted, revealing that both Ca and K increase with Na. This analysis suggests that the concentration of Ca in the OFPW sample originates from rocks such as limestone, calcite, and dolomite is within permissible limits. Ca, a key determinant of water hardness, can affect the toxicity of other compounds and tends to precipitate at higher bicarbonate concentrations [20; 30; 37]. Similarly, the presence of K in OFPW, resulting from natural rock weathering, is consistent with these observations. In Figure 2 (b), the relationship between Sr and Mg relative to Na was plotted, showing that both Sr and Mg increase with Na. This indicates that Sr, a naturally occurring element in rocks and soil, reacts slowly with OFPW to form Sr(OH)_2 and H_2 gas. Exposure to Sr can cause serious skin reactions, seizures, and interfere with blood clotting. Likewise, Mg, which is carried into OFPW from rocks and through human activities in the E&P industries, is also naturally occurring. It is found in minerals like dolomite $\{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\}$ and magnesite (MgCO_3), and contributes to water hardness [32; 42; 53].

In Figure 2 (c), the relationship between Li and Fe relative to Na was examined, showing that both Li and Fe increase with Na. This analysis indicates that the concentration of Li in OFPW is relatively low and less harmful, posing minimal threat to aquatic environments. Similarly, Fe is a critical parameter for assessing the quality of OFPW reinjection. High Fe concentrations can lead to formation plugging, pipeline blockage, corrosion, and increased turbidity of OFPW [1; 31; 35; 47; 57].

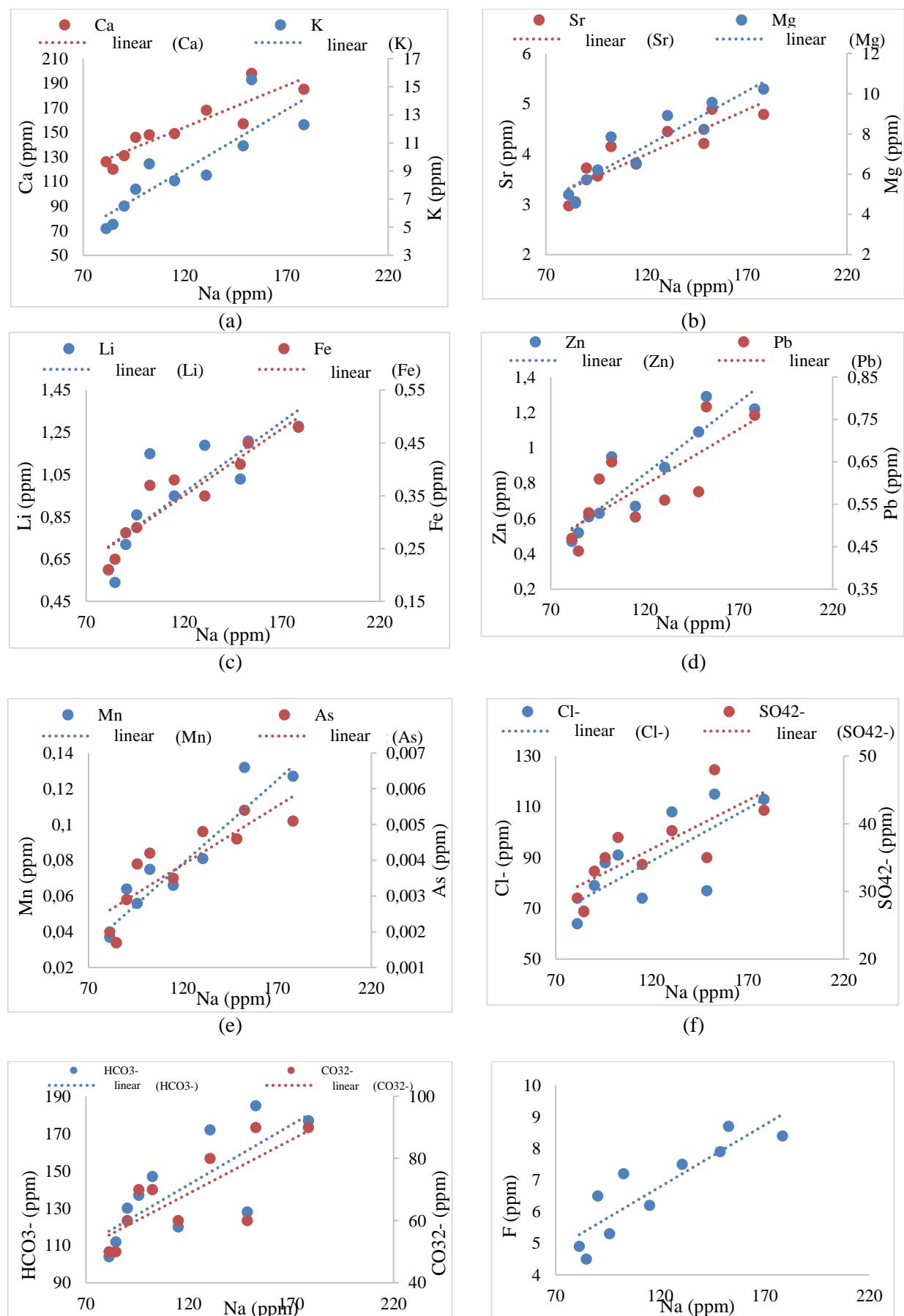
**Fig. 2. Relationship between IEAs and Na concentration in 10 OFPW samples**

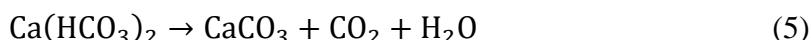
Figure 2(d) illustrates the relationship between Pb and Zn concentrations relative to Na in 10 OFPW samples, revealing a clear positive correlation. Both Pb and Zn concentrations increase proportionally with rising Na levels, suggesting a shared source or geochemical behavior under similar salinity conditions. This trend underscores the environmental risk posed by the discharge of OFPW containing elevated levels of these heavy metals. Pb and Zn are well-documented contaminants in OFPW, often originating from corrosion of galvanized steel infrastructure, well casing materials, or from chemical additives used during drilling and hydraulic fracturing operations [25; 40; 45]. The mobilization of these metals in OFPW presents a significant threat to environmental receptors. If released untreated, such effluents may contaminate surface and groundwater, negatively affecting aquatic ecosystems, altering soil chemistry, and potentially entering the food chain, posing chronic toxicity risks to both wildlife and human populations [20; 43; 56].

In Figure 2(e), the correlation between As and Mn with respect to Na is presented. Both elements exhibit increasing trends with Na concentration, indicating similar solubility or mobilization mechanisms under saline conditions. Notably, a crossover point is observed at Na = 120 ppm, where As and Mn concentrations are approximately equal. This intersection may reflect a shift in geochemical speciation or redox behavior under varying ionic strengths. Mn is known to oxidize readily in the presence of atmospheric oxygen, forming manganese oxyhydroxides that can co-precipitate with other trace metals, potentially influencing the fate and transport of contaminants in receiving environments [8; 37; 54; 57]. As, though typically present at trace levels in OFPW, is of particular concern due to its high toxicity and carcinogenicity. It often exists in multiple oxidation states, with its mobility influenced by redox potential, pH, and the presence of competing ions. The co-occurrence of Mn and As in saline produced water warrants careful monitoring, as their synergistic effects may enhance toxicity and complicate treatment processes [28; 32; 46].

Figure 2 (f), presents the relationship between Cl⁻ and SO₄²⁻ concentrations relative to Na in 10 OFPW samples. Both Cl⁻ and SO₄²⁻ exhibit increasing trends with rising Na levels, indicative of a common salinity driven behavior or shared source within the OFPW. A crossover point is observed at Na = 115 ppm, where Cl⁻ equals SO₄²⁻ concentrations are approximately equal, suggesting a transitional point in ionic dominance that may reflect changes in geochemical conditions or water-rock interaction dynamics. Cl⁻ is one of the most prevalent inorganic anions in OFPW and plays a significant role in determining its overall salinity. It reacts with inorganic elements to form salts, leading to increased salinity due to high NaCl concentrations. Cl⁻ is naturally derived from subsurface formations and, when brought to the surface, readily dissolves in aqueous phases. Under specific thermodynamic conditions, it may volatilize indirectly via aerosol formation, potentially contributing to atmospheric salt loading. SO₄²⁻, while less abundant than Cl⁻, is of critical operational and environmental importance [4; 23; 39; 56]. Its concentration in OFPW influences the risk of scale formation, particularly of low-solubility sulfate minerals such as BaSO₄, SrSO₄ and CaSO₄. These mineral precipitates can obstruct pipelines, production equipment, and injection wells, leading to significant maintenance and remediation costs. Accurate prediction and mitigation of such scaling tendencies require a thorough understanding of sulfate dynamics in relation to salinity, temperature, pH, and the presence of divalent cations. Moreover,

SO_4^{2-} serves as an electron acceptor for sulfate-reducing bacteria (SRB), a group of anaerobic microorganisms commonly found in OFPW. These bacteria play a role in the biodegradation of organic compounds and the biogeochemical cycling of sulfur [27; 33; 43; 51].

Figure 2 (g) illustrates the relationship between HCO_3^- and CO_3^{2-} concentrations relative to Na in OFPW samples. The data reveal a positive correlation, with both HCO_3^- and CO_3^{2-} levels increasing alongside Na concentrations. This trend suggests a shared geochemical behavior influenced by salinity and possibly pH, and confirms that these anions are naturally occurring constituents of OFPW. Their presence is not indicative of significant interaction with carbonate rich lithologies, as such conditions would typically result in substantially higher concentrations of carbonate species due to enhanced mineral dissolution [20, 34, 47, 55]. HCO_3^- and CO_3^{2-} are key contributors to the alkalinity of OFPW and play a critical role in buffering against acidification. They are also significant due to their involvement in scale formation, where one of the most common and problematic forms is CaCO_3 , which precipitates through reactions such as that shown in equation 5 [22; 35; 44].



In Figure 2 (h), the relationship between F and Na was plotted, revealing that F increases with Na. This analysis suggests that elevated concentrations of F could cause eye and nose irritation upon contact with humans. Although F typically occurs in low concentrations in natural rocks, high levels of F can be harmful to the environment. It can damage or inhibit the growth of aquatic flora and fauna [48; 50; 51].

Modelling IEAs using piper class scatter plot. In figure 3, the normalized data from the three different axes of the two equilateral triangles at the bottom were projected onto the diamond plot at the top, which was divided into five classes based on Ca concentration.

- a. In the first class, with Ca ranging from 120 to <131, two data points, (63, 42, 37, 58) and (63, 40, 37, 60), are represented by purple plus symbols.
- b. In the second class, with Ca ranging from 131 to <148, two data points, (62, 40, 38, 60) and (64, 39, 36, 61), are shown by light blue diamond symbols.
- c. In the third class, with Ca ranging from 148 to <157, two data points, (63, 45, 37, 55) and (62, 42, 38, 58), are marked with dark blue square symbols.
- d. In the fourth class, with Ca ranging from 157 to <185, two data points, (63, 50, 37, 50) and (62, 45, 38, 55), are denoted by yellow circle symbols.
- e. In the fifth class, with Ca ranging from 185 to <198.1, two data points, (64, 50, 36, 50) and (64, 45, 36, 55), are represented by red triangle symbols.

The diamond plot analysis reveals that all sample points fall within the left quadrant, indicating that $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ is the predominant component in the OFPW samples [15; 20; 29; 34; 49].

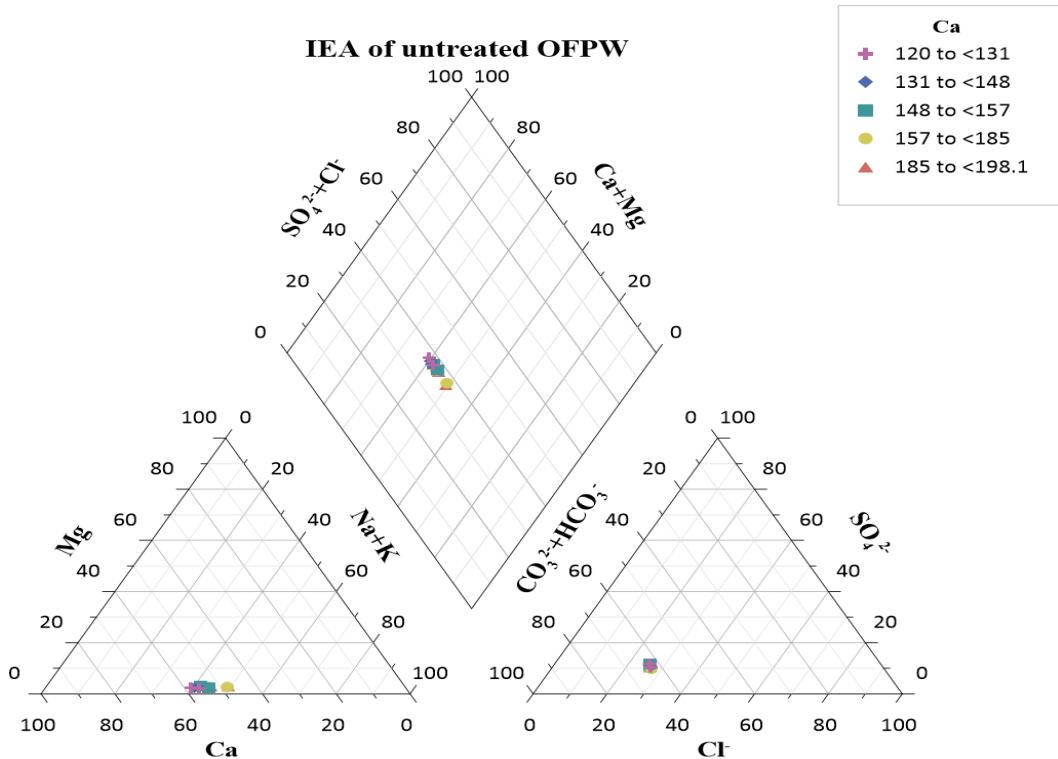


Fig. 3. Design of IEA of S1 – S10 using piper class scatter plot

Implications for water management and regulatory compliance

The elevated concentrations of Na, Li, Sr, Pb, and F observed in this study exceed the CPCB permissible limits for surface water discharge. Nevertheless, the operational water-management strategy in the UAB relies on subsurface reinjection into depleted reservoir intervals, which substantially reduces the likelihood of direct environmental and human exposure. Under these disposal conditions, the aqueous phase containing the dissolved ions remains geologically isolated from freshwater aquifers and surface ecosystems, consistent with established OFPW management practices in India and other petroleum provinces [9; 16; 25; 48].

The hydro-chemical facies classification and correlation analysis presented in this study therefore have direct operational relevance, particularly for:

(a) *Formation Compatibility Assessment*: Knowledge of the ionic composition is critical for predicting scaling potential, especially CaCO₃ and BaSO₄ precipitation, and for assessing corrosion hazards in injection tubing and well casings. The strong correlations between Na and divalent cations (Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺) indicate that high-salinity systems face an increased risk of mineral scale deposition during water–rock mixing [18; 45; 56].

(b) *Injectivity Management*: Although Fe levels remain below CPCB discharge limits, oxidation during surface handling or mixing with residual oxygen in injection lines can lead to Fe(OH)₃ precipitation, which may reduce reservoir permeability. The positive correlation between Fe and salinity suggests that periods of elevated Na warrant enhanced monitoring of Fe to minimize injectivity decline [24; 39; 42; 50].

(c) *Contingency Planning and Emergency Response*: In the unlikely event of accidental surface release or emergency discharge, the water quality characterization presented here supports rapid selection of targeted treatment technologies. The observed dominance of the Ca(HCO₃)₂ facies indicates that pH adjustment and chemical precipitation would be among the most efficient pretreatment approaches prior to surface disposal [20; 31].

(d) *Regulatory Documentation and Reporting*: The analytical dataset generated in this investigation provides robust and defensible evidence to demonstrate compliance with subsurface

reinjection authorization requirements under India's Petroleum Rules and the environmental standards mandated by state pollution control boards [6; 24; 40; 53].

Conclusion

This study presents a comprehensive hydro-chemical assessment of untreated OFPW from the UAB, providing new insights into its chemical composition, hydro-chemical facies, and geochemical controls in a mature, high-salinity petroleum system. The predominance of the $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ facies confirms extensive water–rock interaction in carbonate and silicate rich lithologies, while exceedances of CPCB permissible limits for Na, Li, Sr, Pb, and F indicate the potential environmental risk associated with uncontrolled surface discharge. Notably, the correlation analysis revealed statistically robust positive relationships ($r = 0.75\text{--}0.99$) between Na and 15 inorganic parameters, with a proportionality constant (K_{IEA}) averaging 2.1 e^{-5} . These correlations are not merely numerical artifacts but reflect fundamental geochemical controls, ion exchange on clay minerals, common ion effects, and shared source materials. The resulting linear relationships between Na and constituent ions offer a predictive capability for estimating overall water composition from salinity measurements alone, providing a practical tool for rapid field assessment.

The presence of Pb, Zn, and trace As presents credible environmental and ecological concerns under surface discharge scenarios, reinforcing the suitability of subsurface reinjection as the primary disposal practice in UAB operations. Conversely, Li and Sr, though detected at elevated levels, pose minimal toxicological risk and instead represent natural signatures of prolonged subsurface fluid–rock interaction. By integrating classical hydro-chemical techniques such as Piper trilinear diagrams with modern multivariate statistical approaches, including correlation matrices and empirical proportionality constants, this research demonstrates an effective framework for understanding and predicting OFPW behaviour in complex reservoir systems. The findings enhance operational decision making for scaling mitigation, injectivity management, and regulatory compliance, while contributing to the broader scientific knowledge base supporting environmentally responsible petroleum development in geologically mature hydrocarbon provinces.

Acknowledgements: The authors would like to thank the management of Dibrugarh University for their guidance and support to publish this paper.

Funding: This work was supported by the DST under grant (no. DST/INT/CAN/P-02/2019) and (no. DST/INT/TUNISIA/P-02/2017).

Data Availability: All the data underlying this research is original and available.

Conflict of Interest: Not applicable. and Tipam Sand (TS-IV)

Abbreviation

AAS – Atomic Absorption Spectrophotometer	API – American Petroleum Institute
BCS – Barail Coal Shale	BMS – Barial Main Sand
CDS – Central Dehydration System	CO – Crude Oil
CPCB – Central Pollution Control Board	E&P – Exploration and Production
FP – Flame Photometer	ICP-OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrophotometer
IEA – Inorganic anions and elements	K_{IEA} – Proportionality constant of IEA
MPK – Multi Parameter Kit	OPFW – Oil Field Produced Water
TDS – Total Dissolved Solid	TISAB – Total Ionic Strength Adjustment Buffer
TS-IV – Tipam Sand	UAB – Upper Assam Basin
WOR – Water-to-oil Ratio	

References

1. Abdullayev, B., Rifky, M., Makhmayorov, J., Usmanov, I., Deng, T., & Samadiy, M., "Adsorption Method and Adsorbents for the Recovery of Lithium Compounds from Water Sources. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 71(9): 212-226. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I9P219>.
2. Al-Haleem, A.A., Abdulah, H.H., & Saeed, E.A.J. (2010). Components and treatments of oilfield produced water. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 6(1), 24-30.
3. Amakiri, K.T., Canon, A.R., Molinari, M. & Dimakis, A.A. (2022). Review of oilfield produced water treatment technologies. *Chemosphere*, 298, 134064. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134064>.
4. Bayati, F., Shayegan, J., & Noorjahan, A. (2011). Treatment of oilfield produced water by dissolved air precipitation/solvent sublation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 80(1), 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.10.001>.
5. Boral, P., Gogoi, S.B., Gogoi, T.J., & Gohainb, A.B. (2020). A Preliminary Study on Grain Size Analyses of Reservoir Rocks of the Upper Assam Basin. In *Advances in Petroleum Technology* (pp. 1-28).
6. Çakmakce, M., Kayaalp, N., & Koyuncu, I. (2008). Desalination of produced water from oil production fields by membrane processes. *Desalination*, 222(1-3), 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.147>.
7. Chen, Y., Xie, Q., Sari, A., Brady, P.V., & Saeedi, A. (2018). Oil/water/rock wettability: Influencing factors and implications for low salinity water flooding in carbonate reservoirs. *Fuel*, 215, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.031>.
8. Clark, C. E., & Veil, J. A. (2009). *Produced water volumes and management practices in the United States* (No. ANL/EVS/R-09-1). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
9. Collins, A.G. (1975). *Geochemistry of Oilfield Waters*. Elsevier Scientific Publishers, New York, Volume 1, 1st edition, 495.
10. Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L.D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195-213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>.
11. Deng, S., Yu, G., Chen, Z., Wu, D., Xia, F., & Jiang, N. (2009). Characterization of suspended solids in produced water in Daqing oilfield. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 332(1), 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.09.004>.
12. Elgarbi, H., Aloulou, F., Ali, W.H., Gogoi, S.B., & Kallel, M. (2020). Role of sand particle size in the retention of total petroleum Hydrocarbons and heavy metals. In *Advances in Petroleum Technology* (pp. 371-383). Jenny Stanford Publishing.
13. Elkin, H.F., & Soden, W.E. (1954). Gravity separation of oil. *Sewage and industrial wastes*, 26(7), 854-861. <http://www.jstor.org/stable/25032518>.
14. Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L.C., Biak, D.R.A., Madaeni, S.S., & Abidin, Z.Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of hazardous materials*, 170(2-3), 530-551. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>.
15. Gaur, N., Sarkar, A., Dutta, D., Gogoi, B.J., Dubey, R., & Dwivedi, S.K. (2022). Evaluation of water quality index and geochemical characteristics of surfacewater from Tawang India. *Scientific Reports*, 12(1), 11698. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14760-3>.
16. Ghafoori, S., Omar, M., Koutahzadeh, N., Zendehboudi, S., Malhas, R.N., Mohamed, M., Al-Zubaidi, S., Redha, K., Baraki, F. & Mehrvar, M. (2022). New advancements, challenges, and future needs

on treatment of oilfield produced water: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 289, 120652. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120652>.

17. Gogoi, S. B., Sen, R.K., Rajbongshi, A., & Hazarika, K. (2015). Characterization of oil field produced waters of Upper Assam Basin, India. *Int. J. New Technol. Sci. Eng.*, 2(1), 2349-0780.

18. Gogoi, T.J., & Gogoi, S.B. (2018, November). Analyses and treatment of oil field formation water of upper Assam Basin (India). In *Conference of the Arabian Journal of Geosciences* (pp. 117-120). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01578-7_28.

19. Gogoi, T.J., Gogoi, S.B., & Boral, P. (2020). A review on treatment and management of oilfield produced water. *Advances in Petroleum Technology*, 341-360.

20. Gogoi, T.J., Gogoi, S.B., Kallel, M., Boral, P., & Barman, J. (2020). Analytical treatment of oil field-produced water: a case study from Upper Assam Basin (India). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4), 158. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5166-6>.

21. Gogoi, T.J., Gogoi, S.B., & Sarmah, S. (2018, October). A green approach for oil field produced waters of Upper Assam Basin. In *International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"* (pp. 151-171). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01929-7_11.

22. Gogoi, T., Gogoi, S.B., Boral, P., & Kallel, M. (2019, October). Comparative Study of Various Treatment Processes of Crude Oil Associated Water Produced from the Upper Assam Basin (India). In *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration* (pp. 2089-2094). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_327.

23. Guerra, K., Dahm, K., & Dundorf, S. (2011). *Oil and gas produced water management and beneficial use in the Western United States* (pp. 1-113). Washington, DC: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

24. Harati, H.M. (2012). *Examination of produced water from the Al-Hamada oilfield, Libya* (Doctoral dissertation, Sheffield Hallam University (United Kingdom)).

25. Hardi, M., Siregar, Y. I., Anita, S., & Ilza, M. (2019, January). Determination of heavy metals concentration in produced water of oil field exploration in siak regency. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1156, p. 012009). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1156/1/012009>.

26. Henderson, S. B., Grigson, S. J. W., Johnson, P., & Roddie, B. D. (1999). Potential impact of production chemicals on the toxicity of produced water discharges from North Sea oil platforms. *Marine Pollution Bulletin*, 38(12), 1141-1151. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00144-7).

27. Hewitt, J., Hunter, J.V., & Lockwood, D. (1979). A multiorder approach to BOD kinetics. *Water Research*, 13(3), 325-329. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90213-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90213-6).

28. Horner, J.E., Castle, J.W., & Rodgers Jr, J.H. (2011). A risk assessment approach to identifying constituents in oilfield produced water for treatment prior to beneficial use. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(4), 989-999. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21315453>.

29. Ishola, S.A. (2024). Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment for irrigation and associated purposes using piper trilinear diagram in Papalanto District South-West Nigeria. *Water Resour*, 34(2), 102-130.

30. Islam, R., Faysal, S.M., Amin, R., Juliana, F.M., Islam, M.J., Alam, J., Hossain, M.N. & Asaduzzaman, M. (2017). Assessment of pH and total dissolved substances (TDS) in the commercially available bottled drinking water. *IOSR Journal of Nursing and health Science*, 6(5), 35-40.

31. Jafarinejad, S. (2016). *Petroleum waste treatment and pollution control*. Butterworth-Heinemann.



32. Jafarinejad, S. (2017). Recent developments in the application of sequencing batch reactor (SBR) technology for the petroleum industry wastewater treatment. *Chemistry International*, 3(3), 342-350.
33. Jafarinejad, S., & Jiang, S.C. (2019). Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103326. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103326>
34. Jamshidzadeh, Z. (2020). An integrated approach of hydrogeochemistry, statistical analysis, and drinking water quality index for groundwater assessment. *Environmental Processes*, 7(3), 781-804. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00450-7>
35. Jang, Y., & Chung, E. (2018). Adsorption of lithium from shale gas produced water using titanium based adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(25), 8381-8387. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00805>
36. Jiménez, S.M., Micó, M.M., Arnaldos, M., Medina, F., & Contreras, S. (2018). State of the art of produced water treatment. *Chemosphere*, 192, 186-208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>
37. Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., Lakel, A., Sengelin, M., Barillon, B. & Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water research*, 49, 62-82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>.
38. Khatib, Z., & Verbeek, P. (2002, March). Water to value-produced water management for sustainable field development of mature and green fields. In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?* (pp. SPE-73853). SPE. <https://doi.org/10.2118/73853-MS>.
39. Khatoon, R., Raksasat, R., Ho, Y.C., Lim, J.W., Jumbri, K., Ho, C.D., Chan, Y.J., Abdelfattah, E.A., & Khoo, K.S. (2023). Reviewing advanced treatment of hydrocarbon-contaminated oilfield-produced water with recovery of lithium. *Sustainability*, 15(22), 16016. <https://doi.org/10.3390/su152216016>.
40. Konwar, D., Gogoi, S.B., Barman, J., & Gogoi, M.P. (2017). Correlation analysis of formation water of upper Assam basin for a greener ecosystem. *International Journal of Engineering Technology Science Research (IJETSR)*, 4(8).
41. Konwar, D., Gogoil, S.B., & Gogoi, T.J. (2020). Evaluation of the Corrosion and Scaling Potential of Oilfield Produced Water of the Upper Assam Basin. In *Advances in Petroleum Technology* (pp. 319-340). Jenny Stanford Publishing.
42. Li, G., Guo, S., & Li, F. (2010). Treatment of oilfield produced water by anaerobic process coupled with micro-electrolysis. *Journal of Environmental Sciences*, 22(12), 1875-1882. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60333-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60333-8).
43. Li, H. (2013). Produced water quality characterization and prediction for Wattenberg field. Thesis for the degree of Master of Science. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University..
44. Mandal, H.K. (2014). Influence of wastewater pH on turbidity. *International Journal of Environmental Research and Development*, 4(2), 105-114.
45. Neff, J., Lee, K., & DeBlois, E.M. (2011). Produced water: overview of composition, fates, and effects. *Produced water: Environmental risks and advances in mitigation technologies*, 3-54. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2_1.
46. Neff, J.M. (2002). *Bioaccumulation in Marine Organisms, Effects of Contaminants from Oil Well Produced Water*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-043716-3.X5000-3>.

47. Omar, A.F. B., & MatJafri, M.Z.B. (2009). Turbidimeter design and analysis: a review on optical fiber sensors for the measurement of water turbidity. *Sensors*, 9(10), 8311-8335. <https://doi.org/10.3390/s91008311>.
48. Ozgun, H., Ersahin, M.E., Erdem, S., Atay, B., Sayili, S., Eren, E., Hoshan, P., Atay, D., Altinbas, M., Kinaci, C., & Koyuncu, I. (2013). Comparative evaluation for characterization of produced water generated from oil, gas, and oil-gas production fields. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 41(12), 1175-1182. <https://doi.org/10.1002/clen.201200204>.
49. Reynolds, R. R., & Kiker, R. D. (2003). Produced water and associated issues. *Oklahoma Geological Survey*.
50. Rusydi, A.F. (2018, February). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, p. 012019). IOP publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>.
51. Schimmelmann, A., Lewan, M.D., & Wintsch, R.P. (1999). D/H isotope ratios of kerogen, bitumen, oil, and water in hydrous pyrolysis of source rocks containing kerogen types I, II, IIS, and III. *Geochimica et cosmochimica acta*, 63(22), 3751-3766. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00221-5).
52. Stephenson, M.T. (1992). A survey of produced water studies. In *Produced water: technological/environmental issues and solutions* (pp. 1-11). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2902-6_1.
53. Tellez, G.T., Nirmalakhandan, N., & Gardea-Torresdey, J. L. (2002). Performance evaluation of an activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water. *Advances in Environmental Research*, 6(4), 455-470. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00073-9).
54. Veil, J. , Puder, M.G., & Elcock, D. (2004). *A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane* (No. ANL/EA/RP-112631). Argonne National Lab., IL (US).
55. Visvanath, S.N. (1990), A hundred years of oil: a narrative account of the search for oil in India. Vikas Publishing House.
56. Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International soil and water conservation Research*, 3(4), 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>.
57. Zalewski, W., & Bulkowski, P. (1998). Lithium silicate scale in oilfield steam generation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 37(04). <https://doi.org/10.2118/98-04-05>.

Литература

1. Abdullayev B., Rifky M., Makhmayorov J., Usmanov I., Deng T., Samadiy M. Adsorption Method and Adsorbents for the Recovery of Lithium Compounds from Water Sources // International Journal of Engineering Trends and Technology, 71(9): 212-226. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I9P219/>
2. Al-Haleem, A. A., Abdulah, H. H., & Saeed, E. A. J. (2010). Components and treatments of oilfield produced water. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 6(1), 24-30.
3. Amakiri, K.T., Canon, A.R., Molinari, M. & Dimakis, A.A. (2022). Review of oilfield produced water treatment technologies. *Chemosphere*, 298, 134064. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134064>

4. Bayati, F., Shayegan, J., & Noorjahan, A. (2011). Treatment of oilfield produced water by dissolved air precipitation/solvent sublation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 80(1), 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.10.001>
5. Boral, P., Gogoi, S. B., Gogoia, T. J., & Gohainb, A. B. (2020). A Preliminary Study on Grain Size Analyses of Reservoir Rocks of the Upper Assam Basin. In *Advances in Petroleum Technology* (pp. 1-28).
6. Çakmakce, M., Kayaalp, N., & Koyuncu, I. (2008). Desalination of produced water from oil production fields by membrane processes. *Desalination*, 222(1-3), 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.147>
7. Chen, Y., Xie, Q., Sari, A., Brady, P. V., & Saeedi, A. (2018). Oil/water/rock wettability: Influencing factors and implications for low salinity water flooding in carbonate reservoirs. *Fuel*, 215, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.031>
8. Clark, C. E., & Veil, J. A. (2009). *Produced water volumes and management practices in the United States* (No. ANL/EVS/R-09-1). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
9. Collins, A. G. (1975). *Geochemistry of Oilfield Waters*. Elsevier Scientific Publishers, New York, Volume 1, 1st edition, 495.
10. Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195-213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
11. Deng, S., Yu, G., Chen, Z., Wu, D., Xia, F., & Jiang, N. (2009). Characterization of suspended solids in produced water in Daqing oilfield. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 332(1), 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.09.004>
12. Elgharbi, H., Aloulou, F., Ali, W. H., Gogoi, S. B., & Kallel, M. (2020). Role of sand particle size in the retention of total petroleum Hydrocarbons and heavy metals. In *Advances in Petroleum Technology* (pp. 371-383). Jenny Stanford Publishing.
13. Elkin, H. F., & Soden, W. E. (1954). Gravity separation of oil. *Sewage and industrial wastes*, 26(7), 854-861. <http://www.jstor.org/stable/25032518>
14. Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of hazardous materials*, 170(2-3), 530-551. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>
15. Gaur, N., Sarkar, A., Dutta, D., Gogoi, B. J., Dubey, R., & Dwivedi, S. K. (2022). Evaluation of water quality index and geochemical characteristics of surfacewater from Tawang India. *Scientific Reports*, 12(1), 11698. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14760-3>
16. Ghafoori, S., Omar, M., Koutahzadeh, N., Zendehboudi, S., Malhas, R. N., Mohamed, M., Al-Zubaidi, S., Redha, K., Baraki, F. & Mehrvar, M. (2022). New advancements, challenges, and future needs on treatment of oilfield produced water: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 289, 120652. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120652>
17. Gogoi, S. B., Sen, R. K., Rajbongshi, A., & Hazarika, K. (2015). Characterization of oil field produced waters of Upper Assam Basin, India. *Int. J. New Technol. Sci. Eng*, 2(1), 2349-0780.
18. Gogoi, T. J., & Gogoi, S. B. (2018, November). Analyses and treatment of oil field formation water of upper Assam Basin (India). In *Conference of the Arabian Journal of Geosciences* (pp. 117-120). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01578-7_28
19. Gogoi, T. J., Gogoi, S. B., & Boral, P. (2020). A review on treatment and management of oilfield produced water. *Advances in Petroleum Technology*, 341-360.

20. Gogoi, T. J., Gogoi, S. B., Kallel, M., Boral, P., & Barman, J. (2020). Analytical treatment of oil field-produced water: a case study from Upper Assam Basin (India). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4), 158. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5166-6>
21. Gogoi, T. J., Gogoi, S. B., & Sarmah, S. (2018, October). A green approach for oil field produced waters of Upper Assam Basin. In *International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"* (pp. 151-171). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01929-7_11
22. Gogoi, T., Gogoi, S. B., Boral, P., & Kallel, M. (2019, October). Comparative Study of Various Treatment Processes of Crude Oil Associated Water Produced from the Upper Assam Basin (India). In *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration* (pp. 2089-2094). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_327
23. Guerra, K., Dahm, K., & Dundorf, S. (2011). *Oil and gas produced water management and beneficial use in the Western United States* (pp. 1-113). Washington, DC: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
24. Harati, H. M. (2012). *Examination of produced water from the Al-Hamada oilfield, Libya* (Doctoral dissertation, Sheffield Hallam University (United Kingdom)).
25. Hardi, M., Siregar, Y. I., Anita, S., & Ilza, M. (2019, January). Determination of heavy metals concentration in produced water of oil field exploration in siak regency. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1156, p. 012009). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1156/1/012009>
26. Henderson, S. B., Grigson, S. J. W., Johnson, P., & Roddie, B. D. (1999). Potential impact of production chemicals on the toxicity of produced water discharges from North Sea oil platforms. *Marine Pollution Bulletin*, 38(12), 1141-1151. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00144-7)
27. Hewitt, J., Hunter, J. V., & Lockwood, D. (1979). A multiorder approach to BOD kinetics. *Water Research*, 13(3), 325-329. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90213-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90213-6)
28. Horner, J. E., Castle, J. W., & Rodgers Jr, J. H. (2011). A risk assessment approach to identifying constituents in oilfield produced water for treatment prior to beneficial use. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(4), 989-999. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21315453>
29. Ishola, S. A. (2024). Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment for irrigation and associated purposes using piper trilinear diagram in Papalanto District South-West Nigeria. *Water Resour*, 34(2), 102-130.
30. Islam, R., Faysal, S. M., Amin, R., Juliana, F. M., Islam, M. J., Alam, J., Hossain, M.N. & Asaduzzaman, M. (2017). Assessment of pH and total dissolved substances (TDS) in the commercially available bottled drinking water. *IOSR Journal of Nursing and health Science*, 6(5), 35-40.
31. Jafarinejad, S. (2016). *Petroleum waste treatment and pollution control*. Butterworth-Heinemann.
32. Jafarinejad, S. (2017). Recent developments in the application of sequencing batch reactor (SBR) technology for the petroleum industry wastewater treatment. *Chemistry International*, 3(3), 342-350.
33. Jafarinejad, S., & Jiang, S. C. (2019). Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103326. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103326>
34. Jamshidzadeh, Z. (2020). An integrated approach of hydrogeochemistry, statistical analysis, and drinking water quality index for groundwater assessment. *Environmental Processes*, 7(3), 781-804. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00450-7>

35. Jang, Y., & Chung, E. (2018). Adsorption of lithium from shale gas produced water using titanium based adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(25), 8381-8387. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00805>
36. Jiménez, S. M., Micó, M. M., Arnaldos, M., Medina, F., & Contreras, S. (2018). State of the art of produced water treatment. *Chemosphere*, 192, 186-208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>
37. Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., Lakel, A., Sengelin, M., Barillon, B. & Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water research*, 49, 62-82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>
38. Khatib, Z., & Verbeek, P. (2002, March). Water to value-produced water management for sustainable field development of mature and green fields. In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?* (pp. SPE-73853). SPE. <https://doi.org/10.2118/73853-MS>
39. Khatoon, R., Raksasat, R., Ho, Y. C., Lim, J. W., Jumbri, K., Ho, C. D., Chan, Y.J., Abdelfattah, E.A., & Khoo, K. S. (2023). Reviewing advanced treatment of hydrocarbon-contaminated oilfield-produced water with recovery of lithium. *Sustainability*, 15(22), 16016. <https://doi.org/10.3390/su152216016>
40. Konwar, D., Gogoi, S. B., Barman, J., & Gogoi, M. P. (2017). Correlation analysis of formation water of upper Assam basin for a greener ecosystem. *International Journal of Engineering Technology Science Research (IJETSR)*, 4(8).
41. Konwar, D., Gogoil, S. B., & Gogoi, T. J. (2020). Evaluation of the Corrosion and Scaling Potential of Oilfield Produced Water of the Upper Assam Basin. In *Advances in Petroleum Technology* (pp. 319-340). Jenny Stanford Publishing.
42. Li, G., Guo, S., & Li, F. (2010). Treatment of oilfield produced water by anaerobic process coupled with micro-electrolysis. *Journal of Environmental Sciences*, 22(12), 1875-1882. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60333-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60333-8)
43. Li, H. (2013). Produced water quality characterization and prediction for Wattenberg field. Thesis for the degree of Master of Science. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University.
44. Mandal, H. K. (2014). Influence of wastewater pH on turbidity. *International Journal of Environmental Research and Development*, 4(2), 105-114.
45. Neff, J., Lee, K., & DeBlois, E. M. (2011). Produced water: overview of composition, fates, and effects. *Produced water: Environmental risks and advances in mitigation technologies*, 3-54. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2_1
46. Neff, J.M. (2002). *Bioaccumulation in Marine Organisms, Effects of Contaminants from Oil Well Produced Water*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-043716-3.X5000-3>
47. Omar, A. F. B., & MatJafri, M. Z. B. (2009). Turbidimeter design and analysis: a review on optical fiber sensors for the measurement of water turbidity. *Sensors*, 9(10), 8311-8335. <https://doi.org/10.3390/s91008311>
48. Ozgun, H., Ersahin, M. E., Erdem, S., Atay, B., Sayili, S., Eren, E., Hoshan, P., Atay, D., Altinbas, M., Kinaci, C., & Koyuncu, I. (2013). Comparative evaluation for characterization of produced water generated from oil, gas, and oil-gas production fields. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 41(12), 1175-1182. <https://doi.org/10.1002/clen.201200204>

49. Reynolds, R. R., & Kiker, R. D. (2003). Produced water and associated issues. *Oklahoma Geological Survey*.
50. Rusydi, A. F. (2018, February). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, p. 012019). IOP publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
51. Schimmelmann, A., Lewan, M. D., & Wintsch, R. P. (1999). D/H isotope ratios of kerogen, bitumen, oil, and water in hydrous pyrolysis of source rocks containing kerogen types I, II, IIS, and III. *Geochimica et cosmochimica acta*, 63(22), 3751-3766. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00221-5)
52. Stephenson, M. T. (1992). A survey of produced water studies. In *Produced water: technological/environmental issues and solutions* (pp. 1-11). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2902-6_1
53. Tellez, G. T., Nirmalakhandan, N., & Gardea-Torresdey, J. L. (2002). Performance evaluation of an activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water. *Advances in Environmental Research*, 6(4), 455-470. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00073-9)
54. Veil, J. A., Puder, M. G., & Elcock, D. (2004). *A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane* (No. ANL/EA/RP-112631). Argonne National Lab., IL (US).
55. Visvanath, S.N. (1990), A hundred years of oil: a narrative account of the search for oil in India. Vikas Publishing House.
56. Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International soil and water conservation Research*, 3(4), 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>
57. Zalewski, W., & Bulkowski, P. (1998). Lithium silicate scale in oilfield steam generation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 37(04). <https://doi.org/10.2118/98-04-05>

дата поступления: 1.09.2025

дата принятия: 08.12.2025

© T.J. Gogoi, S.B. Gogoi, T.V. Storchak, D. Konwar, 2025

УДК 630*23

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/09>

Гайнанов С.Г., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю., Янбаев Р.Ю., Бахтина С.Ю.

ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ В ПРИГОРОДНЫХ ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСАХ г. УФЫ

S.G. Gainanov, Y.A. Yanbaev, A.Y. Kulagin, R.Y. Yanbaev, S.Y. Bakhtina

NATURAL REGENERATION IN THE SUBURBAN BROAD-LEAVED STANDS IN UFA

Аннотация. Целью работы является исследование естественного возобновления в пригородных насаждениях Республики Башкортостан с участием в их составе как вяза гладкого, так и инвазивного вида клена ясенелистного. Для ее выполнения по данным таксационных описаний 1996 года лесоустройства был проведен анализ характеристик насаждений 23 выделов вблизи г. Уфы. На этих участках заложены пробные площадки (в каждом выделе, на общей площади $0,0605 \pm 0,0222$ га, с изменениями, в зависимости от густоты подроста, от 0,0353 до 0,4320 га.). В составе основных 1–2 ярусов древостоя и в подлеске ранее были представлены 14 видов, из которых широколиственные древесные растения характеризовались формулой состава в десятичных единицах 3,6В2,4Лп1,2Кл0,7Д0,1И (вяз гладкий, липа мелколистная, клен остролистный, дуб черешчатый и ильм горный, соответственно). У подроста главных представителей этой формации состав (2,2В2,1Кл1,5Лп1И1,0Кля) изменился в сторону уменьшения места широколиственных древесных за счет появления инвазивного клена ясенелистного, доля которого в изученных частях выделов доходила до 8,8 единиц состава. Вид имеет хорошие возможности для дальнейшего укрепления своих позиций из-за представленности крупного подроста высотой более 1,5 м (65,6% молодого поколения этого растения), уступая по численности этой группы только ильму горному. Больше всего подрост клена ясенелистного встречается в чистых вязовниках или насаждениях с доминированием этого растения (3,1–8,8 единиц состава) и реже – в смешанных насаждениях других широколиственных видов. Чем ниже полнота древостоя, тем большей была доля молодого поколения этого вида (коэффициент корреляции Спирмена статистически достоверно отрицательный: $R=-0,60$, $p<0,01$). Обсуждены проблемы угрозы видовому разнообразию аборигенных широколиственных лесов.

Abstract. The aim of the work is to study the natural regeneration in suburban stands of the Republic of Bashkortostan with the participation in them both European white elm and an invasive species, ash-leaved maple. To carry out the study, an analysis of the characteristics of stands in 23 habitats near Ufa was carried out according to the data of the 1996 forest management tax descriptions. Trial plots were established on each of these sites (in each, on a total area of 0.0605 ± 0.0222 ha, with changes, depending on the density of undergrowth, from 0.0353 to 0.4320 ha). The main 1-2 canopy levels of stands and undergrowth previously included 14 species, of which broad-leaved forest trees were characterized by a composition formula in decimal units 3,6 (smooth elm) : 2,4 (small-leaved linden) : 1,2 (holly maple) : 0,7 (pedunculate oak) : 0,1 (mountain elm). In the undergrowth of this formation's main representatives, their composition (2,2 (smooth elm) : 2,1 (holly maple) : 1,5 (small-leaved linden) : 1,0 (ash-leaved maple)) changed towards a decrease in the place of aboriginal broad-leaved tree species due to the appearance of invasive ash-leaved maple, the proportion of which reached in the studied areas to 8,8 decimal units. The species has good opportunities to further strengthen its position due to the presence of larger undergrowth with a height of more than 1.5 m (65.6% of the young generation of this plant) in the total sample, second in number to this group only to mountain elm. The undergrowth of the ash-leaved maple is most often found in pure elm forests or stands with the dominance of this species (3.1–8.8 units of composition) and less in mixed stands of other species. Stands with lower density had a more frequent occurrence of the young generation of this species (the Spearman correlation coefficient was statistically significantly negative: $R=-0.60$, $p<0.01$). The problems of threats to the species diversity of native broadleaf forests are discussed.

Ключевые слова: широколиственные леса; подрост; вяз; клен ясенелистный.

Сведения об авторах: Гайнанов Салават Габдулсаматович, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия, Sgainanov@mail.ru; Кулагин Алексей Юрьевич, ORCID: 0000-0001-7574-4547, д-р биол. наук, Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия, Coolagin@list.ru; Янбаев Юлай Аглямович, ORCID: 0000-0002-7926-2905, д-р биол. наук, Башкирский государственный аграрный университет и Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, г. Уфа, Россия, Yanbaev_ua@mail.ru; Янбаев Руслан Юлаевич, ORCID: 0000-0002-4538-6643; канд. с.-х. наук, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия, Ruslan.Yanbaev@list.ru; Бахтина Светлана Юрьевна, ORCID: 0000-0002-7593-855X, канд. с.-х. наук, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия, Svetlana.Bakhtina@inbox.ru.

Keywords: broad-leaved forests; undergrowth; smooth elm; ash-leaved maple.

About the authors: Salavat G. Gainanov, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia, Sgainanov@mail.ru ; Alexey Yu. Kulagin, ORCID: 0000-0001-7574-4547, Doctor of Biological Sciences, Ufa Institute of Biology of UFSC RAS, Ufa, Russia, Coolagin@list.ru ; Yulai A. Yanbaev, ORCID: 0000-0002-7926-2905, Doctor of Biological Sciences, Bashkir State Agrarian University and Ufa Institute of Biology of UFSC RAS, Ufa, Russia, Yanbaev_ua@mail.ru; Ruslan Yu. Ianbaev, ORCID: 0000-0002-4538-6643; Candidate of Agricultural Sciences, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia, Ruslan.Yanbaev@list.ru; Svetlana Yu. Bakhtina, ORCID: 0000-0002-7593-855X, Candidate of Agricultural Sciences, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia, Svetlana.Bakhtina@inbox.ru.

Гайнанов С.Г., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю., Янбаев Р.Ю., Бахтина С.Ю. Естественное возобновление в пригородных широколиственных лесах г. Уфы // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 123-132. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/09>

Gainanov, S.G., Yanbaev, Y.A., Kulagin, A.Y., Yanbaev, R.Y., & Bakhtina, S.Y. (2025). Natural Regeneration in the Suburban Broad-Leaved Stands in Ufa. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 123-132. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/09>

Введение

В основе успешного внедрения чужеродных древесных видов в местные лесные сообщества лежит сложное взаимодействие между инвазивными способностями растений, уязвимостью для этого локальных экосистем и особенностями практики интродукции [14-16]. В северном полушарии к числу одного из наиболее инвазивных видов относится клен ясенелистный (*Acer negundo* L., Sapindaceae), проявивший после завоза в Европу уникальную фенотипическую и экологическую пластичность. Он занял другие, чем Северной Америке, экологические ниши, и начал использовать на свое благо усиливающееся изменение климата [5]. В ходе своей пост-интродукционной эволюции вид стал представлять угрозу видовому разнообразиюaborигенных широколиственных лесов [9], в том числе в условиях России [7; 10]. В этой связи, актуальной является задача оценки темпов инвазии *A. negundo* в эту формацию, восточная граница которой проходит по территории Башкортостана, а также локализованы наиболее обширные восточные лесные массивы. Известно, что на краях ареала экологические условия являются для организмов особенно экстремальными, что делает их уязвимыми к разнообразным экологическим факторам, в том числе к инвазии. Из широколиственных древесных видов региона, кроме дуба черешчатого (*Quercus robur* L., Fagaceae) [3], снижение жизнеспособности по разным

причинам наблюдается у вяза гладкого (*Ulmus laevis* Pall., Ulmaceae). Вид предпочитает, как и *A. negundo*, влажные почвы низменностей, долин рек [19]. В пределах всего ареала он пострадал от голландской болезни [18], что обусловило появление специальной европейской программы сохранения генетических ресурсов вяза гладкого [6].

Целью работы является исследование естественного возобновления в пригородных насаждениях г. Уфы с участием в их составе одновременно вяза *Ulmus laevis* и инвазивного вида клена ясенелистного *Acer negundo*.

Материалы и методы

Район исследований (рис. 1) в настоящее время представлен лесостепью с широколиственными насаждениями, фрагментами березовых и осиновых лесов и сельскохозяйственных земель, возникшими на их месте, пойменными лесами и лугами.



Рис. 1. Схематическое изображение района исследований.

Примерное расположение изученных насаждений показано красным кругом. Район исследований ограничен координатами 54,485557-54,489117 с.ш. и 55,806072-55,807037 в.д.

Работы были проведены в кварталах 4, 24, 25, 26 и 102 Новотроицкого участкового лесничества Уфимского лесничества. Состав и другие таксационные характеристики (табл. 1) 23 древостоев с *U. laevis* в древесном пологе и среди молодого поколения леса были взяты из таксационного описания лесоустройства 1996 г. Эта информация верифицировалась по материалам лесоустройства 2014 г., а сведения по подросту и подлеску сравнивались с нашими данными для тех же 23 выделов. На отобранных для изучения участках закладывали 1-10 пробных площадок, как правило, в 20x20 м, последовательно расположенных по длинной стороне выдела на условных трансектах. Их общая площадь составила в среднем $0,0605 \pm 0,0222$ га (медиана 0,0353), с изменениями, в зависимости от густоты подроста и площади выдела, в пределах 0,0353-0,4320 га. На отобранных участках произведен сплошной перечет подроста и подлеска с измерением их высоты, а также с оценкой их жизнеспособности (облистения кроны, пропорциональности развития по высоте и диаметру стволиков). Всходы, растения высотой менее 0,2 м не учитывали. Названия видов даны согласно информации, приведенной в [22]. Для анализа измеренных показателей использовалась программа STATISTICA 13.3. После проверки вариационных рядов по

критерию Шапиро-Уилка и выявления не биномиального характера части из них, нами также применены параметры и методы непараметрической статистики. Для выявления связи показателей вычислялся коэффициент корреляции Спирмена R.

Таблица 1
Таксационная характеристика выделов, в которых заложены пробные площадки

№	Состав древостоя	A	H	D	Б	ТЛ	П	M
1	8В2В	75	19	32	3	КТ	0,5	150
2	8В2В	75	19	32	3	КТ	0,4	110
3	8В2В	75	19	32	3	КТ	0,4	110
4	8В2В	75	19	32	3	КТ	0,4	110
5	8В2В	85	18	32	4	КТ	0,4	110
6	6В2В2Олч	85	20	26	3	КТ	0,4	120
7	6В2В2Олч	85	20	26	3	КТ	0,4	120
8	6В2В2Олч	85	20	26	3	КТ	0,4	120
9	5В3Олч2Ос	75	19	24	3	КТ	0,6	170
10	5Лп2В2Кл1Д	35	14	14	2	СН	0,6	130
11	8Кл2В+Е	20	8	6	3	ЗЛ	0,5	50
12	5Кл2Лп1Д2В+Б	10	4	2	3	СН	0,6	20
13	8Кл1Лп1В+С	15	6	4	3	СН	0,7	50
14	7Лп2Кл1В+Б	35	14	14	2	СН	0,8	170
15	3Е2С4Лп1В+Б+ОС*	27	8	10	2	СН	0,7	70
16	3Е2С4Лп1В+Б+Ос*	27	8	10	2	СН	0,7	70
17	9Лп1В+КЛ+Д	45	16	16	3	СН	0,8	210
18	8Д1В1Кл+Б+Лп*	69	18	28	3	СН	0,6	160
19	3Д2Лп2Б1Ос1Кл1В*	32	9	10	3	СНК	0,7	90
20	5Лп2Б1В2Ос+Кл	25	12	10	2	СНК	0,7	120
21	8Б2Т*	50	23	24	1А	СНК	0,6	160
22	8Лп2Ил+Б+Кл+Д	35	13	12	3	СНК	0,6	110
23	7Лп2Ос1Д	75	20	24	3	СНК	0,6	250

Примечания: № – номера участков (расставлены в порядке убывания доли вяза); показатели древостоя по таксационному описанию лесоустройства 1996 г.: А – возраст, Н – высота древесного полога, D – средний диаметр деревьев на высоте груди, Б – бонитет, ТЛ – тип леса (КТ – крапивно-таволговый, СН – снытьевый, ЗЛ – злаковый, СНК – снытьево-костяничниковый), П – полнота, М – запас на 1 га в куб. м., * – лесные культуры.

Результаты и их обсуждение

В основных ярусах 23 выделов, по данным таксационного описания лесоустройства 1996 г., представлены (табл. 1) твердолиственные виды древесных растений вяз гладкий (обозначен В), ильм горный (*Ulmus glabra* Huds., Ил), дуб черешчатый (Д) и клен остролистный (*Acer platanoides* L., Aceraceae, Кл), мягколиственные береза повислая (*Betula pendula* Roth, Betulaceae, Б), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill., Malvaceae, Лп), осина (*Populus tremula* L., Salicaceae, Ос), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., Betulaceae, Олч) и тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L., Salicaceae, Т), а также хвойные сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L., Pinaceae, С) и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb., Pinaceae, Е). *Q. robur*, *P. sylvestris* и *B. pendula* встречалась как в естественных, так и в искусственных насаждениях. В подлеске при лесоустройстве были отмечены черемуха (*Padus avium* Mill., Rosaceae, Чр), рябина (*Sorbus aucuparia* L., Rosaceae, Р) и лещина (*Corylus avellana* L., Betulaceae, Лщ). Два вида, *P. obovata* и *P. balsamifera*, были



представлены только в лесных культурах. Таким образом, в исследованном районе в составе широколиственных насаждений на сравнительно небольшой площади представлено сравнительно высокое биоразнообразие видового уровня (14 таксонов).

По данным лесоустройства 1996 г. (табл. 1) в чистых вязовниках (участки 1–4, 6) молодое поколение леса было представлено только *U. laevis*, растениями высотой 3–4 м в количестве 1–2 тыс. шт/га. Еще в трех насаждениях (5, 7–8) с доминированием этой породы, но с представленностью *A. glutinosa*, состав подроста ранее был описан формулой 8В2Олч, с такими же количеством и высотой растений. Во всех случаях в таксационном описании подрост характеризовался как «благонадежный», хотя его численность и высота не указывались. По нашим результатам (табл. 2), у молодого поколения древесных растений видовое разнообразие в 2025 г. было иным – на исследованных площадях не обнаружено молодое поколение *P. sylvestris* и *P. obovata*, а также *A. glutinosa*. В подлеске по-прежнему обнаружены *P. avium*, *S. aucuparia* и *C. avellana*. В то же время во многих участках нами выявлен инвазивный *A. negundo* (Кля). В целом подтверждена информация лесоустройства 1996 г. о благонадежности подроста. Лишь у *Q. robur* 18,2% растений отнесены к категории «торчков» – экземпляров, у которых каждый год отмирают верхушечные почки и часть осевого побега, а другие побеги появляются из боковых почек. В то же время, в пересчете на 1 га число подроста оказалось меньше 2000 экземпляров (высотой 3–4 м) на один га, приведенных в таксационном описании 1996 г. для насаждений 1–4, 5–6 и 7–8. На этих участках молодое поколение леса было представлено только *U. laevis*, растениями в количестве $1000,0 \pm 119,9$ (медиана 923,1), с выраженной изменчивостью показателя по отдельным участкам – от 81 до 2785,7 (коэффициент вариации 119,8 %).

Таблица 2
Доля подроста и подлеска на исследованных в 2025 г. участках

№	N	Доля пород по 10-балльной шкале									
		В	Кля	Кл	Ил	Лп	Д	Лщ	Б	Ос	Чр
1	923,1	5,8	4,2								
2	1236,8	2,5	4,3		3,2						
3	916,7	7,0	3,0								
4	81,0	6,6	3,4								
5	561,4	6,3		0,9	2,2	0,6					
6	1315,7	0,8	8,8			0,4					
7	900,0	2,2				7,8					
8	645,2	2,0	6,0			0,5	0,5			0,5	0,5
9	365,9	4,6	3,1	2,3							
10	1017,2	1,0		6,8		0,3		0,9			1,0
11	2785,7	2,8		3,1	4,1						
12	836,1	1,6			1,2	5,3	1,5				0,4
13	1096,2	4,4		3,8		0,5	0,2	0,1			0,1
14	1090,9	4,6		0,4	2,1						2,9
15	1548,3	2,4		2,1		4,3		0,5			0,7
16	1933,3	2,2			5,0	2,6	0,2				
17	515,2	2,0		4,7	2,5	0,8					
18	1241,4	1,4		3,6	4,4						0,6
19	1421,9	1,3		2,4		4,6				1,0	0,7
20	351,4	3,1		5,4	0,8	0,7					

21	764,7	3,1	3,8		0,3	0,3		0,9	1,6	
22	1090,9	1,7	6,7		0,5				1,1	
23	590,2	1,4	0,3	1,4	5,3		1,6			

Примечание: № – номера участков; номера групп пробных площадок; N – число растений в пересчете на 1 га.

Вычисленная нами средняя формула состава древостоев широколиственных древесных растений (табл. 1) по данным 1996 г. имела вид 3,6В2,4Лп1,2Кл0,7Д0,1И. Сравнение этих данных со средней долей подроста представителей этой формации во всех 23 участках (2,2В2,1Кл1,5Лп1И1Кля) показывает, что соотношение широколиственных пород у потомства изменилось, в первую очередь за счет появления сравнительно обильного естественного возобновления на изученных участках, составившего 9,6% от численности всего учтенного подроста и подлеска. По сравнению с информацией из таксационного описания 1996 г. к 2025 г. в молодом поколении возросла представленность *U. glabra* и *A. platanoides*. Однако подрост этих двух видов, обычно обильный в этой возрастной группе в условиях Башкортостана, имеет мало возможностей для пропорционально высокого участия в верхнем ярусе древостоев из-за интенсивного отпада на фазе жердняка [1, 2], сохраняясь преимущественно в разрывах древесного полога. Вследствие этого, экологически пластичный [13] *A. negundo* может иметь больше возможностей для территориальной экспансии. Доказательством этого предположения являются также наши данные по размерам изученных растений. По высоте растения *A. negundo* уступают только *U. glabra* (табл. 3). По доле крупного подроста высотой более 1,5 м, имеющего большие шансы для образования древостоя, изученные широколиственные виды образовали ряд: *U. glabra* – *A. negundo* – *U. laevis* – *A. platanoides* – *Tilia cordata*.

Таблица 3
Статистические показатели высоты подроста у пород лесных древесных растений

Породы	Доля подроста (%)			Высота подроста			
	До 0,5	05–1,5	Выше 0,5	Среднее	Медиана	Lim	C, %
В	16,2	39,2	44,6	1,6±0,1	1,2	0,2–5,0	72,6
Кля	3,0	31,4	65,6	2,0±0,1	1,8	0,3–7,0	56,4
Кл	25,5	43,0	31,5	1,4±0,1	1,0	0,2–7,0	94,2
Ил	10,2	12,9	76,9	2,6±0,2	2,3	0,2–7,0	63,8
Лп	11,8	57,3	30,9	1,3±0,1	1,0	0,2–5,0	63,3

Примечание: высота подроста в м; Lim – пределы изменения; C – коэффициент вариации; данные для пород с долей в составе подроста менее 1% (*Q. robur*, *P. balsamifera*, *P. sylvestris*, *P. obovata*) в таблице не представлены.

Выявленные закономерности обобщены рисунке 2. Практически во всех случаях подрост *A. negundo* представлен в чистых вязовниках или насаждениях с доминированием вяза. Исключением являются лесные культуры с составом 8Б2Т на участке 21, где порода отсутствует в верхнем ярусе. *A. negundo* намного меньше представлен в смешанных насаждениях других пород. Нами отмечена закономерность, когда в более высокополнотных древостоях данный инвазивный вид встречается реже. Коэффициент корреляции Спирмена между долей его участия в составе подроста и полнотой насаждения статистически достоверно отрицателен ($R=-0,60$, $p<0,01$). На рисунке 2 видно, что в



вязовниках *A. negundo* имеет большую численность, близкую к подросту *U. laevis*, а доля данного инвазивного вида в этих условиях сопоставима с количеством подроста всех других изученных пород. Такой результат может объясняться тем, что вид эффективнее реализует свой потенциал экологической пластиности в лесных сообществах с менее ограниченными жизненными ресурсами [13], в нашем случае доступом к свету.

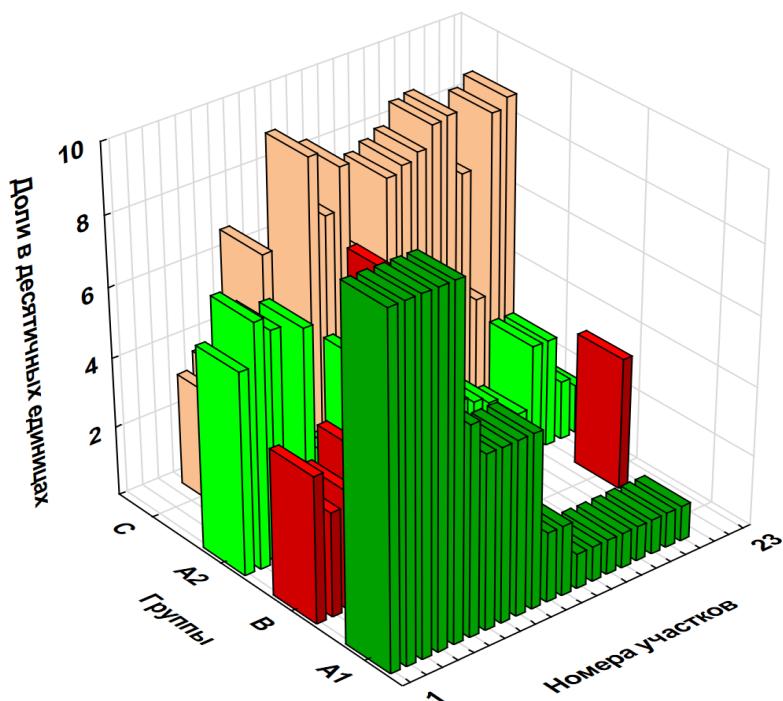


Рис. 2. Доля подроста *A. negundo* (В), *Ulmus laevis* (А2) и других видов древесных растений (С) относительно древостоев с вязом, упорядоченных по мере уменьшения доли *Ulmus laevis* в 1-2 ярусах (А1) на исследованных участках

Судя по нашим результатам и литературным данным, увеличение роли *A. negundo* в составе широколиственных лесов будет только возрастать. После занятия новых местообитаний он начинает изменять среду [15], в том числе доступ к свету другим видам растений [9], регулируя кругооборот веществ [8], влияя на биоту [4], используя механизмы аллелопатии [12] и реализуя свои другие эколого-биологические преимущества [17; 21]. Обнаруженная нами для условий Башкортостана нарастающая угроза снижения видового разнообразия из-за инвазии *A. negundo* справедлива не только для древесных, но и других видов растений. Например, на Среднем Урале в пригородных и городских насаждениях с участием этого вида наблюдалось снижение таксономического разнообразия сосудистых наземных растений до 40% [20]. Но, как показали наши результаты, наиболее вероятным последствием такого внедрения *A. negundo* в природные сообщества может стать ухудшение позиций *U. laevis* из-за приуроченности обоих видов к одним и тем же или близким экологическим нишам. Доказательством этого прогноза может быть выявленная наибольшая численность подроста (в первую очередь, крупного) в крапивно-таволговом типе леса, характерному для долин и пойм рек, припойменным террасам рек Белой, Уфы и Демы.

Заключение

Инвазивное древесное растение клен ясенелистный в пригородных лесах Башкортостана особенно быстрыми темпами распространяется в вязовниках, в первую очередь в низкополнотных насаждениях. Очаги интенсивного возобновления вида в урбанизированных лесах могут стать источником дальнейшей территориальной экспансии этого вида, представляя нарастающую угрозу как позициям вяза *Ulmus laevis*, так и видовому разнообразию аборигенных видов широколиственных лесных древесных растений.

Литература

1. Кулагин Ю.З., Мушинская Н.И. О критических периодах в семенном размножении клена платановидного (*Acer platanoides* L.) // Экология. 1984. № 3. С. 12-16.
2. Шаяхметов И.Ф., Кулагин А.Ю. Естественное подполовое возобновление и высотно-возрастная структура подроста ильма горного (*Ulmus glabra* Huds.) в водоохранно-защитных лесах Павловского водохранилища (р. Уфа) // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2005. № 2. С. 24-31.
3. Buschbom J., Yanbaev Y., Degen B. Efficient long-distance gene flow into an isolated relict oak stand // The Journal of Heredity. 2011. Vol. 102. 464-472. <https://doi.org/10.1093/jhered/esr023>.
4. Callaway R.M, Thelen G.C., Rodriguez A. et al. Soil biota and exotic plant invasion // Nature. 2004. 427. 731-733. <https://doi.org/10.1038/nature02322>.
5. Camenen E., Porté A., Benito-Garzon M. American trees shift their niches when invading Western Europe: evaluating invasion risks in a changing climate // Ecology and Evolution. 2016. <https://doi.org/10.1002/ece3.2376>.
6. Collin E., Rusanen M., Ackzell L. et al. Methods and progress in the conservation of elm genetic resources in Europe // Res. Foundation. Forest Res. Inst. 2004. 13. 261-272. <https://doi.org/10.5424/831>.
7. Emelyanov A.V, Frolova S.V. Ash-leaf maple (*Acer negundo* L.) in coastal phytocenoses of the Vorona River // Russ. J. Biol. Invasions, 2011. 2. 161-163. <https://doi.org/10.1134/S2075111711030052>.
8. Horodecki P, Jagodzinski A.M. Tree species effects on litter decomposition in pure stands on afforested post-mining sites // For. Ecol. Manag. 2017. 406. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.059>.
9. Knight K.S., Oleksyn J., Jagodzinski A.M. et al. Overstorey tree species regulate colonization by native and exotic plants: a source of positive relationships between understorey diversity and invasibility // Divers. Distrib. 2008. 14. 666–675. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00468.x>.
10. Kostina M.V., Yasinskaya O.I., Barabanshchikova N.S. et al. Toward an issue of box elder invasion into the forests around Moscow // Russ. J. Biol. Invasions. 2016. 7. 47-51. <https://doi.org/10.1134/S2075111716010069>.
11. Lamarque L., Porté A., Eymeric C. et al. A test for pre-adapted phenotypic plasticity in the invasive tree *Acer negundo* L. // PloS one. 2013. 8. e74239. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074239>.
12. Natividad C., González M., Alías G. Comparison of the allelopathic potential of non-native and native species of Mediterranean ecosystems // Plants. 2023. 12. 972. <https://doi.org/10.3390/plants12040972>.
13. Porté A.J., Lamarque L.J., Lortie C.J. et al. Invasive *Acer negundo* outperforms native species in non-limiting resource environments due to its higher phenotypic plasticity // BMC Ecol. 2011. 11, 28. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-28>.
14. Rejmanek M., Richardson D. What attributes make some plant species more invasive? // Ecology. 1996. 77. 1655-1661. <https://doi.org/10.2307/2265768>.



15. Richardson D.M., Pyšek P., Rejmanek M. et al. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions // *Divers. Distrib.* 2000. 6. 93–107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x>.
16. Richardson D.M., Pysek P. Plant invasions: merging the concepts of species invasiveness and community invisibility // *Progress in Physical Geography*. 2006. 30. 409-431. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp490pr>.
17. Saccone P., Pagès J.-P., Girel J. et al. *Acer negundo* invasion along a successional gradient: early direct facilitation by native pioneers and late indirect facilitation by conspecifics // *The New phytologist*. 2010. 187. 831-42. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03289.x>.
18. Santini A., Montaghi A., Vendramin G.G. et al. Analysis of the Italian dutch elm disease fungal population // *J. Phytopathol.* 2005. 153. 73–79. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2004.00931.x>.
19. Torre S., Sebastiani F., Burbui G. et al. Novel insights into refugia at the southern margin of the distribution range of the endangered species *Ulmus laevis* // *Front Plant Sci.*, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826158>.
20. Veselkin D.V., Dubrovin D.I., Pustovalova L.A. High canopy cover of invasive *Acer negundo* L. affects ground vegetation taxonomic richness // *Sci. Rep.*, 2021. 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00258-x>.
21. Veselkin D.V., Dubrovin D.I. Diversity of the grass layer of urbanized communities dominated by invasive *Acer negundo* // *Russ. J. Ecol.*, 2019. 50. 413–421. <https://doi.org/10.1134/S1067413619050114>.
22. powo.science.kew.org (дата обращения 20.11.2025 г.).

References

1. Kulagin, Yu.Z., Mushinskaya, N.I. (1984). O kriticheskix periodax v semennom razmnozhenii klena platanovidnogo (*Acer platanoides* L.) // *E`kologiya*, 3. 12-16. (in Russ.).
2. Shayaxmetov, I.F., & Kulagin, A.Yu. (2005). Estestvennoe podpologovoe vozobnovlenie i vy`sochno-vozrastnaya struktura podrosta il`ma gornogo (*Ulmus glabra* Huds.) v vodooxranno-zashhitny`x lesax Pavlovskogo vodoxranilishha (r. Ufa). *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik*, (2). 24-31. (in Russ.).
3. Buschbom, J., Yanbaev, Y., & Degen, B. (2011). Efficient long-distance gene flow into an isolated relict oak stand. *The Journal of Heredity*, 102. 464-472. <https://doi.org/10.1093/jhered/esr023>.
4. Callaway, R.M, Thelen, G.C., & Rodriguez, A. et al. (2004). Soil biota and exotic plant invasion. *Nature*, 427. 731-733. <https://doi.org/10.1038/nature02322>.
5. Camenen, E., Porté, A., & Benito-Garzon, M. (2016). American trees shift their niches when invading Western Europe: evaluating invasion risks in a changing climate. *Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1002/ece3.2376>.
6. Collin, E., Rusanen, M., & Ackzell, L. et al. (2004). Methods and progress in the conservation of elm genetic resources in Europe. Res. Foundation. *Forest Res. Inst.*, 13. 261-272. <https://doi.org/10.5424/831>.
7. Emelyanov, A.V, & Frolova, S.V. (2011). Ash-leaf maple (*Acer negundo* L.) in coastal phytocenoses of the Vorona River. *Russ. J. Biol. Invasions*, 2. 161–163. <https://doi.org/10.1134/S2075111711030052>.
8. Horodecki, P, J& agodzinski, A.M. (2017). Tree species effects on litter decomposition in pure stands on afforested post-mining sites. *For. Ecol. Manag.*, 406. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.059>.

9. Knight, K.S., Oleksyn, J., & Jagodzinski, A.M. et al. (2008). Overstorey tree species regulate colonization by native and exotic plants: a source of positive relationships between understorey diversity and invasibility. *Divers. Distrib.*, 14. 666–675. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00468.x>.
10. Kostina, M.V., Yasinskaya, O.I., & Barabanshchikova, N.S. et al. (2016). Toward an issue of box elder invasion into the forests around Moscow. *Russ. J. Biol. Invasions*, 7. 47–51. <https://doi.org/10.1134/S2075111716010069>.
11. Lamarque, L., Porté, A., & Eymeric, C. et al. (2013). A test for pre-adapted phenotypic plasticity in the invasive tree *Acer negundo* L. *PloS one*, 8. e74239. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074239>.
12. Natividad, C., González, M., & Alías, G. (2023). Comparison of the allelopathic potential of non-native and native species of Mediterranean ecosystems. *Plants*, 12. 972. <https://doi.org/10.3390/plants12040972>.
13. Porté, A.J., Lamarque, L.J., & Lortie, C.J. et al. (2011). Invasive *Acer negundo* outperforms native species in non-limiting resource environments due to its higher phenotypic plasticity. *BMC Ecol.*, 11, 28. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-28>.
14. Rejmanek, M., & Richardson, D. (1996). What attributes make some plant species more invasive? *Ecology*, 77. 1655–1661. <https://doi.org/10.2307/2265768>.
15. Richardson, D.M., Pyšek, P., & Rejmanek, M. et al. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Divers. Distrib.*, 6. 93–107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x>.
16. Richardson, D.M., & Pysek, P. (2006). Plant invasions: merging the concepts of species invasiveness and community invasibility. *Progress in Physical Geography*, 30. 409–431. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp490pr>.
17. Saccone, P., Pagès, J.-P., & Girel, J. et al. (2010). *Acer negundo* invasion along a successional gradient: early direct facilitation by native pioneers and late indirect facilitation by conspecifics. *The New phytologist*, 187. 831–42. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03289.x>.
18. Santini, A., Montaghi, A., & Vendramin, G.G. et al. (2005). Analysis of the Italian dutch elm disease fungal population. *J. Phytopathol.*, 153. 73–79. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2004.00931.x>.
19. Torre, S., Sebastiani, F., & Burbui, G. et al. (2022). Novel insights into refugia at the southern margin of the distribution range of the endangered species *Ulmus laevis*. *Front Plant Sci.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826158>. PMID: [2022.826158](#).
20. Veselkin, D.V., Dubrovin, D.I., & Pustovalova, L.A. (2021). High canopy cover of invasive *Acer negundo* L. affects ground vegetation taxonomic richness. *Sci. Rep.*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00258-x>.
21. Veselkin, D.V., & Dubrovin, D.I. (2019). Diversity of the grass layer of urbanized communities dominated by invasive *Acer negundo*. *Russ. J. Ecol.*, 50. 413–421. <https://doi.org/10.1134/S1067413619050114>.
22. powo.science.kew.org (дата обращения 20.11.2025 г.).

дата поступления: 22.10.2025

дата принятия: 25.11.2025

© Гайнанов С.Г., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю., Янбаев Р.Ю., Бахтина С.Ю., 2025

